

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Influencia del proceso de electrocoagulación en la  
remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en  
soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la  
Universidad Continental, 2019**

Jean Christian Perales Vílchez

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2019

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de "[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Perú](#)"

**ASESOR**

Ing. Edwin Paucar Palomino

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por protegerme a lo largo de mi vida y etapa universitaria, por brindarme las fuerzas para superar obstáculos, por la oportunidad de realizar esta investigación desde los inicios de mis estudios universitarios.

A la Universidad Continental, por ser mi casa de estudios universitarios. Así mismo, a los ingenieros de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Ambiental, por brindarme conocimientos y experiencia de la vida profesional. A mi asesor, Msc Ingeniero Edwin Paucar Palomino, por apoyarme en todos los momentos de la investigación. Al laboratorio de Ciencias Básicas, por permitirme desarrollar las corridas experimentales de mi investigación y proporcionarme todas las herramientas para su realización.

Finalmente, a mi familia, a mi madre Estela Vílchez por su apoyo incondicional, a mi padre Sixto Perales y abuela Rosa Poma, que desde la gloria de Dios me cuidan; a mi hermana Lizeth Perales, por sus exigentes metas, de igual modo a Rosario Dávila, por su ayuda en el laboratorio y apoyo constante, así como también a mis colegas investigadores y amigos.

## **DEDICATORIA**

A toda mi familia, principalmente a mi madre Estela y mi padre Sixto, por sus consejos y su motivación constante que impulsaron a terminar mi carrera universitaria, a mi hermana Lizeth, por esa motivación al inculcar en mí el deseo de superación profesional.

## ÍNDICE

PORTADA.....	I
ASESOR .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE .....	V
LISTA DE TABLAS .....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
INTRODUCCIÓN.....	XI
<b>CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>13</b>
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.1.1. Planteamiento del problema.....	13
1.1.2. Formulación del problema .....	16
1.2. OBJETIVOS .....	17
1.2.1. Objetivo general .....	17
1.2.2. Objetivos específicos.....	17
1.3. Justificación e importancia .....	17
1.3.1. Justificación metodológica .....	17
1.3.2. Justificación práctica .....	18
1.3.3. Justificación tecnológica.....	18
1.3.4. Justificación ambiental .....	19
1.3.5. Importancia.....	19
1.4. HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.....	20
1.4.1. Hipótesis general.....	20
1.4.2. Hipótesis específicas.....	20
1.4.3. Variables independientes .....	20
1.5. Operacionalización de la variable .....	21
1.5.1. Definición conceptual .....	21
1.5.2. Dimensión.....	22
1.5.3. Indicadores .....	22
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
2.1. Antecedentes del estudio .....	23
2.2. Bases teóricas .....	28
2.2.1. Contaminación de cuerpos de agua.....	28
2.2.2. Mecanismos de toxicidad del cromo .....	30
2.2.3. Técnicas de tratamiento de efluentes que contienen cromo:.....	32
2.2.4. Tratamiento Químicos .....	33
2.2.5. Técnicas electroquímicas .....	36
2.2.6. Mecanismos y reacciones del proceso de electrocoagulación .....	37
2.3. Definición de términos básicos.....	42
<b>CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>46</b>
3.1. Método y alcance de la investigación.....	46
3.1.1. Método de la investigación .....	46
3.1.2. Tipo de la investigación .....	50
3.1.3. Nivel de la investigación .....	51
3.2. Diseño de la investigación.....	51
3.3. Población y muestra .....	53
3.3.1. Población.....	53
3.3.2. Muestra.....	53
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	53
3.4.1. Instrumentos de recolección de datos.....	54

3.4.2. Técnicas de Procesamiento y tratamiento de datos .....	54
<b>CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>56</b>
4.1. Resultados del tratamiento.....	56
4.1.1. Preparación de la curva de calibración .....	56
4.1.2. Parámetros iniciales del proceso de electrocoagulación .....	58
4.1.3. Resultados obtenidos en los cuatro tratamientos .....	58
4.1.4. Resultados de la relación de voltaje eléctrico y tiempo y la eficiencia de remoción de cromo.....	64
4.2. Prueba de hipótesis.....	68
4.2.1. Hipótesis específicas.....	68
4.2.2. Hipótesis general.....	80
4.3. Discusión de resultados .....	81
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>84</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>86</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Concentración de $\text{Cr}^{+6}$ en efluentes de industrias mineras .....	14
Tabla 2: Concentración de metales pesados presentes en el agua de la cuenca del río Moche ...	14
Tabla 3: Tratamientos empleados en la remoción de metales pesados.....	15
Tabla 4: Descarga anual de metales pesados en las cuencas amazónicas .....	19
Tabla 5: Operacionalización de variables .....	21
Tabla 6: Variables de la investigación.....	52
Tabla 7: Esquema del diseño de la investigación .....	52
Tabla 8: Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	54
Tabla 9: Absorbancia de las distintas concentraciones de $\text{Cr}^{+6}$ .....	56
Tabla 10: Concentración inicial de $\text{Cr}^{+6}$ .....	58
Tabla 11: Absorbancia y concentración de $\text{Cr}^{+6}$ removido en el tratamiento 1.....	59
Tabla 12: Absorbancia y concentración de $\text{Cr}^{+6}$ removido en el tratamiento 2.....	60
Tabla 13: Absorbancia y concentración de $\text{Cr}^{+6}$ removido en el tratamiento 3.....	61
Tabla 14: Absorbancia y concentración de $\text{Cr}^{+6}$ removido en el tratamiento 4.....	62
Tabla 15: Promedio de la concentración removida de $\text{Cr}^{+6}$ obtenidos en cada tratamiento .....	63
Tabla 16: Porcentaje de remoción de $\text{Cr}^{+6}$ logrado en los 4 tratamientos .....	65
Tabla 17: Cromo hexavalente removido en diferentes tiempos por cada tratamiento .....	69
Tabla 18: Pruebas de normalidad para las concentraciones de $\text{Cr}^{+6}$ removido en función del tiempo por cada voltaje eléctrico empleado.....	72
Tabla 19: Correlaciones de Rho de Spearman para las concentraciones de $\text{Cr}^{+6}$ removido en relación al tiempo .....	73
Tabla 20: Cromo hexavalente removido cuando se utilizó diferentes voltajes eléctricos.....	75
Tabla 21: Pruebas de normalidad para las concentraciones de $\text{Cr}^{+6}$ removido en función del voltaje eléctrico por cada tiempo de electrocoagulación empleado .....	78
Tabla 22: Correlaciones de Rho de Spearman para las concentraciones de $\text{Cr}^{+6}$ removido en relación al voltaje eléctrico .....	79



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Proceso básico de adsorción .....	34
Figura 2: Sistema de electrocoagulación con ánodo y cátodo de aluminio .....	38
Figura 3: Celda de electrocoagulación.....	49
Figura 4: Dimensiones del reactor Batch .....	50
Figura 5: Curva de calibración para las concentraciones de $\text{Cr}^{+6}$ y sus respectivas absorbancias .....	57
Figura 6: Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio a diferentes voltajes eléctricos y tiempos de electrocoagulación .....	64
Figura 7: Eficiencia del proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio a diferentes voltajes eléctricos y tiempos de electrocoagulación .....	66
Figura 8: Gráfica de efectos principales para el porcentaje de remoción de $\text{Cr}^{+6}$ .....	67
Figura 9: Gráfica de efectos principales para el porcentaje de remoción de $\text{Cr}^{+6}$ .....	68
Figura 10: Diagrama de dispersión del $\text{Cr}^{+6}$ removido vs tiempo (10 voltios).....	70
Figura 11: Diagrama de dispersión del $\text{Cr}^{+6}$ removido vs tiempo (15 voltios).....	70
Figura 12: Diagrama de dispersión del $\text{Cr}^{+6}$ removido vs tiempo (20 voltios).....	71
Figura 13: Diagrama de dispersión del $\text{Cr}^{+6}$ removido vs tiempo (30 voltios).....	72
Figura 14: Diagrama de dispersión del $\text{Cr}^{+6}$ removido vs voltaje eléctrico (10 minutos) .....	76
Figura 15: Diagrama de dispersión del $\text{Cr}^{+6}$ removido vs voltaje eléctrico (20 minutos) .....	76
Figura 16: Diagrama de dispersión del $\text{Cr}^{+6}$ removido vs voltaje eléctrico (30 minutos) .....	77
Figura 17: Diagrama de dispersión del $\text{Cr}^{+6}$ removido vs voltaje eléctrico (40 minutos) .....	78

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación determinó la influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ , presentando como objetivos específicos la influencia de la variación del tiempo de electrocoagulación y del voltaje eléctrico sobre la remoción del  $\text{Cr}^{+6}$  a nivel de laboratorio empleando el reactor tipo Batch, para el cumplimiento de estos objetivos se preparó una solución de  $\text{Cr}^{+6}$  a partir de dicromato de potasio, de esta solución madre se prepararon más soluciones para hallar sus absorbancias con las cuales se construyó una curva de calibración que brindó una ecuación para hallar las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  en diferentes soluciones, seguidamente, se llevaron a cabo 4 tratamientos, utilizando como voltaje eléctrico 10 voltios, 15 voltios, 20 voltios y 30 voltios en el primer, segundo, tercer y cuarto tratamiento respectivamente, en cada tratamiento se halló la concentración del  $\text{Cr}^{+6}$  después de transcurrir 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos y 40 minutos, en el primer tratamiento cuando se utilizó 10 voltios se logró remover 2,516 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ , en el segundo tratamiento cuando se utilizó 15 voltios se logró remover 4,467 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ , en el tercer tratamiento se logró remover 4,753 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$  y en el cuarto tratamiento se logró remover 5,233 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ , con respecto a los porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  se alcanzó un 100 % de remoción en un tiempo de electrocoagulación de 40 minutos y con una voltaje eléctrico de 30 voltios siendo estos dos valores los óptimos para lograr una remoción completa de  $\text{Cr}^{+6}$ .

**Palabras clave:** electrocoagulación, tiempo, voltaje eléctrico, electrodos de aluminio, remoción de  $\text{Cr}^{+6}$

## ABSTRACT

This research work determined the influence of the electrocoagulation process on the removal of  $\text{Cr}^{+6}$ , presenting as specific objectives the influence of the variation of the electrocoagulation time and the electrical voltage on the removal of  $\text{Cr}^{+6}$  at the laboratory level using the Batch type reactor, for the fulfillment of these objectives, a solution of  $\text{Cr}^{+6}$  was prepared from potassium dichromate, from this stock solution more solutions were prepared to find its absorbances with which a calibration curve was built that provided an equation to find the concentrations of  $\text{Cr}^{+6}$  in different solutions, then 4 treatments were carried out, using as electrical voltage 10 volts, 15 volts, 20 volts and 30 volts in the first, second, third and fourth treatment respectively, in each treatment  $\text{Cr}^{+6}$  concentration was found after 10 minutes, 20 minutes, 30 minutes and 40 minutes, in the first treatment when using 10 volts, 2,516 ppm of  $\text{Cr}^{+6}$  was removed, in the second treatment when 15 volts was used, 4,467 ppm of  $\text{Cr}^{+6}$  was removed, in the third treatment, 4,753 ppm of  $\text{Cr}^{+6}$  was removed and in the fourth treatment it was possible to remove 5,233 ppm of  $\text{Cr}^{+6}$ , with respect to the removal percentages of  $\text{Cr}^{+6}$  100 % removal was achieved in an electrocoagulation time of 40 minutes and with an electrical voltage of 30 Volts, these two values being optimal for achieving a complete  $\text{Cr}^{+6}$  removal.

**Keywords:** electrocoagulation, time, electrical voltage, aluminum electrodes,  $\text{Cr}^{+6}$  removal

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación consiste en determinar la influencia del proceso de electrocoagulación con un reactor del tipo Batch en la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ , a nivel de laboratorio en la Universidad Continental. El principal objetivo es determinar el tiempo de electrocoagulación y voltaje eléctrico óptimo a través de la aplicación de una serie de pruebas realizadas en el laboratorio de química de la Universidad Continental, con el fin de mitigar la contaminación del agua que genera el metal pesado del  $\text{Cr}^{+6}$ . Por ello se planteó y formuló el problema general y los problemas específicos, tomando en cuenta diversos aspectos; asimismo, se formularon los objetivos en base a las variables del estudio e hipótesis del estudio, la justificación, se revisó bibliografía para el planteamiento de la metodología; las cuales fueron esenciales para demostrar la aplicabilidad del método.

En el primer capítulo se detalla la caracterización del trabajo que se realizó, resaltando el problema general y los específicos, de igual modo, se propone los objetivos de la investigación que se deben alcanzar, para demostrar la justificación e importancia de realizar este estudio, así mismo, frente a la interrogante se planteó la hipótesis tentativa y las variables correspondientes al tema de investigación.

En el segundo capítulo, se estructura la revisión bibliográfica, considerando los trabajos de investigación enfocados en el mismo tema realizado anteriormente. Asimismo, se cataloga el proceso de diseño y elaboración de un reactor tipo Batch, donde se especifican cada paso de acuerdo a la bibliografía recolectada, también se menciona el tipo de método que se utilizó para conocer la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  que presentaron las soluciones en las diferentes corridas experimentales, por ello se describen las características que influirán en el tiempo de electrocoagulación sobre la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ .

En el tercer capítulo se menciona la metodología de investigación a utilizar, del mismo modo se describe el tipo de investigación y el nivel alcanzado, detallando la población y la muestra a ser estudiada, también presenta el diseño de la investigación mediante un cuadro de doble entrada; además se especifican los instrumentos de recolección de datos, por último, las técnicas para la recolección y tratamiento de datos.

En el cuarto capítulo se presenta el análisis e interpretación de resultados, se especifican los resultados obtenidos en los ensayos y su respectivo procesamiento de datos, cada ensayo está justificado de acuerdo a la norma vigente, verificando que cumplan sus valores máximos admisibles propuestos en estos.

Finalmente, se concluye y se recomienda según sea el caso, las cuales son afirmaciones a base de ensayos y criterios demostrados. Adicionalmente se adjuntan los anexos, en donde se muestran las fichas de observación, curva de calibración certificada, de igual modo, todo el procedimiento y las herramientas que se utilizaron para su realización.

El autor

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente el principal problema que viene atravesando la humanidad es la contaminación ambiental, la cual conlleva a la degradación de los ecosistemas, siendo los cuerpos receptores los más dañados, en un caso particular la contaminación del agua provocada por la inserción de materia extraña como: químicos, metales pesados, heces, microorganismos, efluentes urbanos y residuos provocados por la industria como minería, textilería, concentradoras, papeleras, curtiembre, fabricación de pinturas etc. Estas materias alteran la composición del agua y deterioran su calidad provocando que deje de ser apta para el consumo humano o para el uso diario que se le daría si cumpliera los estándares de calidad, ante esta realidad las consecuencias son claras en la salud humana que se ve perjudicada ante la formación de nuevas enfermedades generadas por el consumo de agua contaminada o por la exposición de productos contaminados (1).

Uno de los metales contaminantes presentes en el agua es el cromo el cual puede deberse a los efluentes generados por la industria de curtiembres, pinturas, textilería, galvanizados, aleaciones, etc. (2).

En el Perú el incremento industrial de pintura, curtiembres, automotriz, peletería, plantas concentradoras, etc. han generado la contaminación de aguas superficiales como ríos, lagunas, acuíferos y lagos, asimismo, la contaminación de agua subterránea y suelos, debido a los efluentes con altas concentraciones de contaminantes principalmente metales pesados (Pb, Cr, Cu, Zn, As, Ni y Cd) tal

como se observa en la tabla 1, que describe la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  que descargan diversas industrias mineras (3).

**Tabla 1: Concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  en efluentes de industrias mineras**

<b>Minera</b>	<b>Concentración de <math>\text{Cr}^{+6}</math></b>
Raura	2,8 mg/L
Casapalca	130,0 mg/L
Milpo	34,5 mg/L
Chungar	60,2 mg/L
Huarón	15,0 mg/L
Atacocha	54,8 mg/L
Colquisiri	21,0 mg/L

**Fuente: ANCO, Percy, Procedimiento para la separación de cromo hexavalente de efluentes mineros (3).**

Estos metales pesados que se generan en las diferentes industrias se descargan a las aguas superficiales sin ningún tipo de tratamiento, generando un gran impacto ambiental negativo, ya que muchos de estos contaminantes no son biodegradables y representan una alta toxicidad para la vida acuática aún en pequeñas concentraciones, esto se observa en la tabla 2 que presenta las concentraciones de metales pesados que se encuentran en el río Moche, los cuales sobrepasan los estándares de calidad ambiental (4).

**Tabla 2: Concentración de metales pesados presentes en el agua de la cuenca del río Moche**

<b>Metal pesado</b>	<b>Concentración</b>
Fe	17,807 mg/L
Pb	0,643 mg/L
Cd	0,145 mg/L
Cu	1,071 mg/L
Zn	6,083 mg/L
As	0,082 mg/L

**Fuente: HUARANGA, Félix [et al.] Contaminación por metales pesados en la cuenca del Río Moche 1980-2010, La Libertad - Perú (4)**

En vista de esta realidad para mejorar la calidad del agua es necesario tratar las aguas contaminadas mediante procesos que sean altamente eficientes pero que no representen mayores costos, tratamientos como los que se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3: Tratamientos empleados en la remoción de metales pesados**

<b>Método</b>	<b>Metal pesado</b>	<b>Eficiencia</b>
Biopolímeros	$\text{Cd}^{+2}$ , $\text{Cu}^{+2}$ , $\text{Ni}^{+2}$	98 %, 98% y 97 %
Adsorción con desechos agrícolas	$\text{Cr}^{+3}$ , $\text{Zn}^{+2}$ , $\text{Pb}^{+2}$	100 %, 99,7 % y 99,1 %
Fotocatálisis	$\text{Cr}^{+6}$ , $\text{Cr}^{+3}$ y Cr total	98,38 %, 99,71 % y 98,09 %
Coagulación y floculación	Fe, Zn y Ni	98 %, 83 % y 63 %
Electrocoagulación	$\text{Cu}^{+2}$ , $\text{Cr}^{+3}$ , $\text{Ni}^{+2}$ , $\text{Zn}^{+2}$	>97 % en todos los metales
Precipitación química	$\text{As}^{+2}$ , $\text{Cu}^{+3}$ , $\text{Cd}^{+2}$ , $\text{Pb}^{+2}$	>99,9 %

**Fuente: CAVIEDES, Diego[et al.]Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión (5)**

La aplicación de un proceso electroquímico como la electrocoagulación ha venido siendo utilizado para el tratamiento de aguas residuales, ya que este método aplica corriente eléctrica a la solución contaminada generando la desestabilización de los contaminantes presentes, todo este proceso se lleva a cabo dentro de un reactor en el cual se ubica los electrodos a los cuales se les suministra la corriente eléctrica con un voltaje no tan alto (6).

El fin de este tratamiento es la formación de flóculos, formado por la aglomeración de contaminantes, que fueron desestabilizados por una gran carga de cationes; una vez que los flóculos se formen podrán ser separados de la solución a tratar por procesos mecánicos; gracias a estos procesos, la electrocoagulación es eficiente en la remoción de metales pesados, asimismo en la remoción de materia orgánica, DQO y DBO, adicionalmente este proceso puede oxidar compuestos tóxicos a no tóxicos, en vista de las ventajas de esta tecnología es recomendable su aplicación para el tratamiento de efluentes de las industrias de curtiembres, alimentarias, textiles, minería, etc. Además, de poder ser aplicados en la potabilización de agua o en el tratamiento de las aguas residuales (6).



### **1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La electrocoagulación es el tipo de tratamiento electroquímico que puede solucionar la problemática para los efluentes de procedencia industrial, minera, etc., conteniendo  $\text{Cr}^{+6}$ , por su eficiencia según y porque los gastos en energía eléctrica pueden compensarse, por la recuperación de agua para su recirculación al proceso y posiblemente de algunos insumos químicos, de esta manera minimizar la explotación de recursos, gastos energéticos, destrucción de hábitats naturales y paisajes, contribuyendo a la sostenibilidad del planeta y reduciendo impactos ambientales negativos que aceleran el cambio climático que hoy en día se aprecia con más relevancia que en años anteriores.

En esta investigación se utilizó electrodos metálicos de aluminio, ya que es el más abundante, económico, eficiente, y fácil de conseguir en comparación con otros tipos de materiales utilizados como electrodos, asimismo, el tiempo óptimo y el voltaje eléctrico utilizado para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ , es por ello que se formula una alternativa de solución, considerando al tiempo y el voltaje eléctrico como agentes determinantes para evaluar el proceso de electrocoagulación. La gran dificultad es el desconocimiento del uso apropiado de los tiempos y voltajes, por tanto, recae la responsabilidad del ingeniero optar por este método de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ . Esta investigación pretende optimizar el tiempo y el voltaje eléctrico suficiente y requerido para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ , que permita optimizar y reducir costo de operación del reactor y aplicarlos en cualquier efluente industrial, minero y más que contengan  $\text{Cr}^{+6}$ .

La investigación propone determinar la influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  con el fin de mitigar la contaminación ambiental que este metal pesado genera, por ello se formula la siguiente pregunta:

#### **1.1.2.1. Problema general**

¿Cómo influye el proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019?

### **1.1.2.2. Problemas específicos**

¿Cómo influye la variación del tiempo de electrocoagulación con reactor tipo Batch en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019?

¿Cómo influye la variación del voltaje eléctrico con reactor tipo Batch en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019?

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar la influencia del proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Determinar la influencia de la variación del tiempo de electrocoagulación con reactor tipo Batch en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.
- b. Determinar la influencia de la variación del voltaje eléctrico con reactor tipo Batch en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

### **1.3.1. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

Actualmente se observa que el tratamiento de los distintos efluentes residuales industriales se realizan por métodos conocidos, costosos, adición de coagulantes y reactivos, esto debido al desconocimiento del método de operación de la electrocoagulación y el uso apropiado del mismo para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ ; pues un inadecuado uso del tiempo y del voltaje eléctrico puede ocasionar un impacto significativo en los costos de operación; por lo cual se consideró a estos indicadores como factores primordiales para el funcionamiento y la optimización del proceso de electrocoagulación.

### **1.3.2. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

La electrocoagulación ofrece muchas ventajas como un equipo simple y una fácil automatización del proceso, no requiere la adición de productos químicos, entre otras ventajas que incluye el proceso es la floculación, causada por la turbulencia generada por el oxígeno y la evolución del hidrógeno que produce una mezcla suave, y ayuda a que las partículas desestabilizadas se unan entre ellas y generen partículas más grandes, además, estas burbujas de oxígeno e hidrógeno formadas pueden ayudar a aumentar la eficiencia de este proceso de separación al llevar las partículas a la parte superior de la solución, donde pueden eliminarse más fácilmente, todo esto generan lodos más compactados (7).

Añadiendo más ventajas, también se menciona que este método tiene la alta efectividad de remoción de un amplio rango de contaminantes, como: metales pesados, grasas y aceites, materia orgánica, fosfatos y cianuros, purifica el agua y permite su reciclaje, el paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminantes más pequeños, incrementando la coagulación.

### **1.3.3. JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA**

El proceso de investigación consistió en diseñar y fabricar un reactor tipo Batch; el cual empleó el tiempo y el voltaje como factores importantes para optimizar el proceso de electrocoagulación, el cual se basa en el suministro de corriente eléctrica a través de electrodos (ánodo y cátodo de aluminio) ubicados en forma paralela, esta corriente eléctrica provoca la desestabilización de las partículas contaminantes que se encuentran en la solución acuosa a tratar.

### 1.3.4. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL

La electrocoagulación no genera impacto ambiental negativo, debido a que este método no añade ningún tipo de reactivos, ácidos, o coagulantes, a comparación de otros métodos de remoción de metales pesados; los cuales al generar residuos secundarios estos podrían tener un impacto negativo al ambiente; el único residuo que podría ser causando con el proceso es la presencia de iones del material de electrodo de sacrificio usado en los lodos generados (8).

### 1.3.5. IMPORTANCIA

La importancia de este trabajo de investigación es debido al problema frecuente de la contaminación de aguas por metales pesados y que van a dar a fuentes de aguas sin ser tratadas, tal como se demuestra en la investigación de YUSTA GARCÍA, Raúl quien determinó la contaminación de metales pesados en ríos amazónicos, la descarga anual de plomo, cadmio, bario, cromo y cromo hexavalente a los ríos Pastaza, Corrientes, Tigre y Marañón se muestran en la tabla 4 (9).

**Tabla 4: Descarga anual de metales pesados en las cuencas amazónicas**

Captación	Descarga anual (ton métricas/año)				
	Pb	Ba	Cd	Cr	Cr <sup>+6</sup>
Pastaza	0,36	25,91	0,02	0,33	-
Corrientes	2,49	179,48	0,16	2,14	5,92
Tigre	4,63	333,23	0,30	4,08	7,76
Marañón	5,14	370,05	0,34	4,54	8,43

**Fuente: YUSTA, Raúl [et al.] Contaminación del agua por actividades de extracción de petróleo en los ríos amazónicos del norte del Perú (9).**

En relación a lo mencionado, los metales pesados contaminan la biodiversidad y al ser humano haciendo imprescindible buscar nuevas alternativas de tratamientos eficaces diferentes a los tratamientos convencionales mal ejecutado, caro, etc. El proceso de electrocoagulación permite tratar el agua contaminada por el metal pesado Cr<sup>+6</sup> dejando la alternativa de un nuevo tratamiento.

## **1.4. HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES**

### **1.4.1. HIPÓTESIS GENERAL**

H0: El proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch no influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

H1: El proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

### **1.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

- a. H1: La variación del tiempo de electrocoagulación con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.
- b. H2: La variación del voltaje eléctrico con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

### **1.4.3. VARIABLES INDEPENDIENTES**

#### **1.4.3.1. Variable independiente**

Proceso de electrocoagulación.

#### **1.4.3.2. Variable dependiente**

Remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ).

## 1.5. OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE

Tabla 5: Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	
		Dimensiones	Indicadores
<b>VI: Proceso de electrocoagulación</b>	Se refiere al proceso electroquímico muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales, por medio del cual se desestabilizan las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo diferentes potenciales eléctricos y distintos periodos de tiempos, a través de placas metálicas paralelas.	- Tiempo de electrocoagulación - Diferencia de potencial eléctrico	- minutos - voltios
<b>VD: Remoción de cromo hexavalente Cr<sup>+6</sup></b>	Se refiere a la concentración de compuestos químicos como el NaCr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , CrO <sub>3</sub> y sales de cromo y dicromato, que contienen el metal pesado, cromo, en el estado de oxidación 6., dicho metal es utilizado en diferentes procesos industriales como en la fabricación de pinturas, aleaciones de acero para evitar la oxidación, curtiembre, recubrimientos anticorrosión, así como una variedad de usos de nicho.	- Concentración de Cr <sup>+6</sup>	- ppm Cr <sup>+6</sup> - porcentaje de remoción de Cr <sup>+6</sup>

Fuente: Elaboración Propia

### 1.5.1. DEFINICIÓN CONCEPTUAL

- a. **Proceso de electrocoagulación.** - Se refiere al proceso electroquímico muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales, por medio del cual se desestabilizan las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo diferentes potenciales eléctricos y distintos periodos de tiempo, a través de placas metálicas paralelas.
- b. **Remoción de cromo hexavalente.** - Se refiere a la concentración removida de compuestos químicos como el NaCr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, CrO<sub>3</sub> y sales de cromo y dicromato, que contienen el metal pesado, cromo, en el estado de oxidación 6, dicho metal es utilizado en diferentes procesos industriales como en la fabricación de pinturas, aleaciones de acero para evitar la oxidación,

curtiembre, recubrimientos anticorrosión, así como una variedad de usos de nicho.

## **1.5.2. DIMENSIÓN**

### **1.5.2.1. Tiempo de electrocoagulación**

Es el valor numérico del tiempo empleado para la electrocoagulación.

### **1.5.2.2. Diferencial del Potencial Eléctrico**

Es valor numérico de la corriente eléctrica que se aplica en la electrocoagulación.

### **1.5.2.3. Concentración de Cromo hexavalente en ppm (mg/L)**

Es el valor numérico de Cromo hexavalente determinado por espectrofotometría.

## **1.5.3. INDICADORES**

- minutos
- voltios
- porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

La investigación de MAYTA, Roddy y MAYTA, Jhony tuvo como objetivo la remoción de DQO y  $\text{Cr}^{+3}$  en las aguas residuales de curtiembre, utilizando un proceso de electrocoagulación (EC), evaluaron la incidencia del tiempo (15 min a 45 min), voltajes (5 V a 10 V), diluciones (0 a 2) y las interacciones entre las variables; siendo la concentración de DQO inicial mayor a los límites máximos permisibles para aguas de alcantarillado pero menor para aguas superficiales, además las concentraciones de  $\text{Cr}^{+3}$  iniciales superaron los límites máximos permisibles para concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  y Cr total en aguas de curtiembre; durante el tratamiento el pH y la temperatura de la solución a tratar se incrementaron sin embargo la conductividad bajo; a un tiempo de 45 minutos, dilución de 2 y suministrando 10 voltios lograron un máximo porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+3}$  de 98 % y DQO de 48 %; la investigación presenta resultados que cumplen con los límites máximos permisibles decretados para efluentes de industrias de curtiembres en alcantarillados según el DS 003-PRODUCE (10); en cuanto a pH, temperatura y nivel de DQO, los resultados demostraron que el proceso de electrocoagulación fue eficiente en el tratamiento de aguas de curtiembre obteniendo mejores porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+3}$  y DQO cuando el tiempo voltaje y dilución fueron mayores (11).

El artículo de investigación de CAMARGO Juan Pablo, que tiene como título “Remoción de metales pesados presentes en aguas residuales a través del proceso de electrocoagulación”, tuvo como objetivo la revisión de literatura relacionada a tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados aplicando un proceso de electrocoagulación; la investigación presentó como resultado que los procesos de electrocoagulación son eficientes en la descontaminación del agua, ya que logra la precipitación de una mayor cantidad de partículas contaminantes y a la vez no representan grandes costos operativos



en comparación al tratamiento del agua con coagulantes químicos, finalmente la investigación concluyó en que la electrocoagulación es eficiente para mejorar la calidad del agua ya sea en la potabilización o en el tratamiento de las aguas residuales, pudiendo disminuir los contaminantes ya sea de origen orgánico o inorgánico además de no generar residuos provenientes de los materiales de los electrodos, asimismo, se demostró que el sulfuro también puede ser eliminado por la electrocoagulación evitando de este modo la contaminación del aire, además la electrocoagulación puede ser incluido dentro del proceso de una planta de tratamiento biológico de aguas residuales por su alta capacidad de eliminar contaminantes (12).

El artículo de investigación de ARANGO Álvaro, que tiene como título “Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: desarrollo y potencial de aplicación”, cuyo objetivo de la investigación es la recopilación de la literatura acerca de electrocoagulación presentando sus primeras aplicaciones, su eficiencia en el tratamiento de agua contaminada por actividades del ser humano asimismo presenta los beneficios de su aplicación y las desventajas que podría presentar, la investigación presentó los alcances que podría tener este tratamiento y posteriormente describe el diseño de las celdas de electrocoagulación y las reacciones que ocurren durante el tratamiento de las aguas; el trabajo concluyó que la electrocoagulación es en la actualidad una tecnología emergente que se presenta como alternativa para el tratamiento de aguas residuales, siendo una alternativa para el problema medioambiental de las aguas residuales representando una opción altamente eficiente (13).

El artículo de investigación de MORALES POSADA, Nelly, que tiene como título “Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas”, tuvo como objetivo el tratamiento de aguas residuales para su posterior uso, utilizando celdas de electrocoagulación a escala, el fin principal del tratamiento fue la remoción de metales pesados disueltos en el agua residual industrial, la investigación presento como resultado, porcentajes de remoción en Cr del 51,65 %, cumpliendo los estándares de calidad de aguas vertidas, por otra parte, se logró un porcentaje de remoción de Ni del 18,09 %, Pb del 50 %, Zn del 47,37 %, cuando se utilizó electrodos de cobre en las celdas de electrocoagulación se provocó una inmersión en la polaridad de los electrodos desencadenando un aumento de este metal pesado en un 519,48 %, en función de los resultados se concluyó que el tratamiento de la electrocoagulación es un método emergente capaz de disminuir la concentración de contaminantes hasta el cumplimiento de las normas establecidas para la calidad del agua residual de la industria galvánica, lográndose una remoción de cromo, níquel, plomo y zinc en un 51,65 %, 18,09 %, 50 % y 47,37 %, respectivamente, dichos resultados advierten de una afinidad electrónica en el tratamiento (14).

El autor HERNÁNDEZ Pablo, realizó la investigación titulada “Procesos Avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación” inicialmente estudio las variables que influyeron en el proceso de electrocoagulación (reactor Batch discontinuo) observando que cuando el voltaje fue de 40 V y la intensidad de corriente fue de 31 A/m<sup>2</sup>, valores altos, lograron porcentajes de remoción de sulfatos y nitritos de 52 % y 68 % respectivamente, con respecto a los fosfatos logró un mayor porcentaje de remoción de 50 % cuando el voltaje fue de 35 V, cuando se incrementa el voltaje hasta valores mayores a 200 V y la intensidad se reduce a valores menores a 20 A/m<sup>2</sup> no logró la eliminación de los contaminantes mencionados, con respecto al porcentaje de remoción de DQO, se alcanzó un 50 % cuando el voltaje osciló entre 100 V y 200 V, y la intensidad vario entre 200 A/m<sup>2</sup> y 320 A/m<sup>2</sup>, la remoción coliformes totales y *Escherichia coli* se logró con un voltaje de 50 V, y una intensidad de 104 A/m<sup>2</sup>, además el pH fue importante, siendo eficaz mantenerlo entre 5 a 9, este parámetro se incrementó levemente al final del proceso en todas las corridas experimentales, esto pudo deberse a la producción y consumo de iones OH<sup>-</sup> que se mantuvo en equilibrio, además, se observó la influencia de la distancia entre placas sobre la conductividad, intensidad y densidad de corriente, temperatura y voltaje, se advirtió que una menor distancia entre placas genero el incremento del voltaje eléctrico y de la densidad de corriente, además observó que este último afecta considerablemente al tiempo de residencia e influyó considerablemente en la remoción de partículas contaminantes, además evaluó el voltaje eléctrico demostrando que no necesariamente un incremento de voltaje conlleva un incremento en el porcentaje de remoción de contaminantes, en vista de estos resultados infirió que el parámetro esencial en el proceso de electrocoagulación fue la densidad de corriente eléctrica además del pH, tipo y concentración del contaminante, la estabilidad y peso del floculo aglomerado los cuales eran espumosos y no se formaban necesariamente en el cono Imhoff, con el uso de electrodos de aluminio o hierro, logró máximos porcentajes de remoción de cobre, cromo, níquel y zinc que vario entre un 85 % a 100 %, resultados que logró con pH básicos de la solución en el electro coagulador, es importante mencionar que esto vario en el tipo de electrodo utilizado y en el metal en ser removido; en conclusión, los metales se eliminaron por reducción, precipitación, absorción y adsorción con hidróxidos polimérico de Fe<sup>+3</sup> o Al<sup>+3</sup> (15).

El autor ARÉVALO César, realizó la investigación: “Influencia de la densidad de corriente eléctrica y tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación” concluyó que el tiempo y la densidad de corriente suministrada a los electrodos incidieron en la eliminación de As<sup>+3</sup>, logrando disminuir la concentración de As de 15,02 ppm hasta alcanzar un porcentaje de eliminación de 99,20 % a un tiempo de 45 minutos, voltaje de 40 mA/cm<sup>2</sup>, en base a estos resultados

afirmó que la electrocoagulación es un tratamiento eficiente para mejorar la calidad del agua disminuyendo la concentración de metales pesados (16).

El autor AGUILAR Edwar, realizó la investigación titulada “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala de laboratorio para el tratamiento de agua”, analizó la influencia del tiempo, pH intensidad de corriente y distancia entre electrodos en la eliminación de contaminantes de aguas residuales industriales, en base a las corridas experimentales obtuvo un valor de conductividad recomendable para suministrar una buena densidad de corriente eléctrica en la solución a tratar, logró una remoción de DQO de 87 % de las aguas residuales de la industria de pintura, cuando al tiempo, pH e intensidad de corriente fueron 15 minutos y 7 A, 12 y 5 A respectivamente, el porcentaje de remoción de DQO se incrementó hasta 90 % cuando la intensidad aumento a 8 A y el pH disminuyó a 4, sin embargo este resultado se descartó por el incremento de gasto en corriente y reactivos para modificar el pH, asimismo, se estudió los lodos generados en el tratamiento, observándose que estos presentan menor humedad y son más sólidos que los generados en tratamientos biológicos, cualidades que facilitan la disposición de estos lodos; en referencia al gasto del tratamiento se advierte que es económico ya que no representan gran consumo de energía y los electrodos pueden ser cambiados cada medio año (17).

El autor BIANCA, Ana Claudia y MARILIZ, C. Glanert, realizó la investigación titulada “Eliminación de cromo de las aguas residuales de curtido por precipitación química y electrocoagulación”, el cromo, utilizado en forma de sulfato de cromo básico (como  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) para el procesamiento de pieles, tiene efectos adversos bien conocidos cuando se elimina de forma inadecuada en el medio ambiente, ya que es altamente tóxico, altamente persistente en el medio ambiente y no es biodegradable, las curtiembres gastan grandes cantidades de agua para el procesamiento de pieles; por lo tanto, la recuperación de Cr de las aguas residuales de curtido es una alternativa ecológica y económicamente viable, ya que puede evitar que se elimine una mayor cantidad de lodo que contiene cromo en los vertederos de residuos industriales peligrosos; el cumplimiento de la legislación ambiental también plantea un desafío para la industria del cuero, ya que los parámetros para descargar las aguas residuales tratadas en los cuerpos de agua receptores son cada vez más estrictos, lo que fomenta la práctica de técnicas para la recuperación y reutilización de insumos químicos en el curtido de pieles. Este estudio se centra en la eliminación del cromo presente en las aguas residuales de bronceado mediante precipitación química y electrocoagulación. En ambos métodos, el cromo se separa en forma de un precipitado insoluble mediante la adición de álcali o mediante la oxidación y reducción de los ánodos metálicos; la precipitación química resultó en el 99,74 % de la eficiencia de eliminación, mientras que en la electrocoagulación con electrodos de Al, Cu y Fe, la eficiencia de

eliminación fue del 97,76 %, 69,91 % y 90,27 %, respectivamente, después de estos procesos, el cromo puede usarse nuevamente como agente de bronceado en el procesamiento del cuero (18).

El autor BHAGAWAN, D. [et al.] realizaron la investigación: “Efecto de los parámetros operativos sobre la remoción de metales pesados por electrocoagulación” investigaron el rendimiento de la electrocoagulación (CE) para la tratabilidad de metales mixtos (cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), níquel (Ni) y zinc (Zn)) a partir de aguas residuales industriales. (EPW), el estudio se centró principalmente en los parámetros que afectan el proceso de la CE: pH de la solución a tratar y metal base del electrodo, la distancia entre electrodos, el tamaño del electrodo y la tensión aplicada, se observó que el pH 8 es el mejor para la eliminación de metales. El par de electrodos Fe – Fe con una separación entre electrodos de 1 cm y un área de superficie de electrodos de 40 cm<sup>2</sup> tiene una tensión aplicada de 8 V es observado para ser más eficiente en la remoción de metal, los experimentos demostraron que los porcentajes máximos de remoción para los metales como Cr, Ni, Zn, Cu y Pb fueron de 96,2 %, 96,4 %, 99,9 %, 98 % y 99,5%, respectivamente, a un tiempo de reacción de 30 min, en condiciones óptimas observaron que el consumo de energía fue de 51,40 kWh/m<sup>3</sup>, observaron que el método es muy efectivo en la eliminación de metales del efluente de galvanoplastia (19).

El autor EL-NAAS, Muftah y HAMDAN, Shaima, realizó la investigación: “Eliminación de cromo hexavalente del agua subterránea por electrocoagulación continua”, evaluaron la electrocoagulación continua para la eliminación de cromo hexavalente del agua subterránea, además examinaron diferentes parámetros operativos para determinar sus efectos sobre la eliminación de cromo, incluidos el caudal de entrada, el tipo de electrodo, la densidad de corriente eléctrica, el pH inicial, la concentración inicial de cromo, la conductividad y la temperatura, los resultados experimentales indicaron que la eliminación del cromo se vio afectada por la disposición de los electrodos (hierro y/o aluminio); así, la mayor eficiencia de eliminación (100 % de eliminación de cromo) se obtuvo al usar un par de electrodos Fe-Fe a un tiempo de electrocoagulación de 5 minutos, un caudal de entrada de 90 mL/min y una densidad de corriente eléctrica de 7,94 mA/cm<sup>2</sup> (20).

El autor BAZRAFSHAN, Edris, MAHVI, Amir, NASERI, Simin y MESDAGHINIA, Ali, realizó la investigación titulada “Evaluación del desempeño del proceso de electrocoagulación para la eliminación de Cr<sup>+6</sup> de soluciones de cromo sintético utilizando electrodos de Fe y Al” investigaron el rendimiento de la electrocoagulación con ánodo de sacrificio de hierro y aluminio para la eliminación de Cr<sup>+6</sup>, estudiaron varios parámetros de trabajo, como la concentración de contaminantes, DQO, pH, el voltaje, turbidez y tiempo de contacto para alcanzar porcentajes de eliminación altos; prepararon soluciones de concentraciones

variables de cromo (5 ppm-50 ppm-500 ppm), para seguir el progreso del tratamiento, tomaron muestras de 25 mL a intervalos de 20 minutos durante hasta 1 hora y luego se filtraron (0,45  $\mu$ ) para eliminar el lodo formado durante la electrólisis, el pH de la solución inicial también ha variado para estudiar sus efectos sobre el porcentaje de remoción de cromo; los resultados logrados con aguas residuales sintéticas revelaron que las capacidades de eliminación más efectivas de los metales estudiados se podían lograr cuando el pH se mantenía en 3, además, el aumento del potencial eléctrico, en el rango de 20 V-40 V, mejoró la tasa de tratamiento sin afectar la carga requerida para reducir las concentraciones de iones metálicos bajo niveles legales admisibles, aplicaron el proceso con éxito al tratamiento de aguas residuales de galvanoplastia obteniéndose una reducción efectiva de la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  bajo los límites legales justo después de 20 min-60 min, en base a los resultados se demostró que la eficiencia de eliminación del cromo con electrodos de hierro es mayor en comparación con los electrodos de aluminio, además, se concluyeron que el proceso de electrocoagulación tiene el potencial de ser utilizado para la extracción rentable de metales pesados del agua y las aguas residuales (21).

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. CONTAMINACIÓN DE CUERPOS DE AGUA**

#### **2.2.1.1. Contaminación del agua por metales pesados**

Es la contaminación por materias extrañas que deteriora la calidad del agua. La contaminación del agua cubre el medio ambiente en forma líquida, como la contaminación del océano y la contaminación de los ríos. Según se aplica el término, la contaminación líquida ocurre en los océanos, lagos, arroyos, ríos, aguas subterráneas y bahías, en áreas cortas que contienen líquidos. Implica la liberación de sustancias tóxicas, gérmenes patógenos, sustancias que requieren mucho oxígeno para descomponerse, sustancias fácilmente solubles, radiactividad, etc. que se depositan en el fondo y sus acumulaciones interferirán con la condición de los ecosistemas acuáticos (22).

Aunque hay muchas fuentes de contaminación del agua, la industrialización y la urbanización son dos de los culpables del aumento del nivel de contaminación de metales pesados. Los metales pesados son transportados por escorrentía desde industrias, municipios y áreas

urbanas. La mayoría de estos metales terminan acumulándose en el suelo y los sedimentos de los cuerpos de agua (22).

Los metales pesados se pueden encontrar en los rastros de las fuentes de agua y aun así son muy tóxicos e imponen graves problemas de salud a los humanos y otros ecosistemas. Esto se debe a que el nivel de toxicidad de un metal depende de factores como los organismos que están expuestos a él, su naturaleza, su función biológica y el período en el que los organismos están expuestos al metal (23).

Las industrias, la agricultura, las aguas residuales, los procesos mineros y metalúrgicos, y las escurrientías también conducen a la liberación de contaminantes a diferentes compartimentos ambientales. Se ha observado que los procesos antropogénicos de metales pesados van más allá de los flujos naturales para algunos metales. Los metales emitidos naturalmente en los polvos arrastrados por el viento provienen principalmente de áreas industriales. Algunas fuentes antropogénicas importantes que contribuyen significativamente a la contaminación por metales pesados en el medio ambiente incluyen el escape de automóviles que libera plomo; fundición que libera arsénico, cobre y zinc; insecticidas que liberan arsénico y quema de combustibles fósiles que liberan níquel, vanadio, mercurio, selenio y estaño. Se ha descubierto que las actividades humanas contribuyen más a la contaminación ambiental debido a la fabricación diaria de bienes para satisfacer las demandas de la gran población. (24).

#### **2.2.1.2. Contaminación por Cromo**

El cromo (Cr) es un elemento natural presente en la corteza terrestre, con estados de oxidación (o estados de valencia) que van desde el  $\text{Cr}^{+2}$  al  $\text{Cr}^{+6}$ . Los compuestos de cromo son estables en forma trivalente  $\text{Cr}^{+3}$  y se encuentran en la naturaleza en este estado en minerales, como el ferrocromito. La forma hexavalente  $\text{Cr}^{+6}$  es el segundo estado más inestable. El cromo elemental Cr (0) no ocurre naturalmente. El cromo entra en varias matrices ambientales (aire, agua y suelo) de una amplia variedad de fuentes naturales y antropogénicas, y la mayor liberación proviene de establecimientos industriales. Las industrias con la mayor contribución a la liberación de cromo incluyen procesamiento de metales, instalaciones de curtiduría, producción de cromato, soldadura de acero

inoxidable y producción de pigmentos de cromo y ferrocromo. El aumento en las concentraciones ambientales de cromo se ha relacionado con la liberación de cromo en el aire y las aguas residuales, principalmente de las industrias metalúrgica, refractaria y química. El cromo liberado al medio ambiente por la actividad antropogénica ocurre principalmente en la forma hexavalente  $\text{Cr}^{+6}$  (25) (26).

#### **2.2.1.3. Cromo Hexavalente**

El cromo hexavalente  $\text{Cr}^{+6}$  es un contaminante industrial tóxico que varias agencias reguladoras y no reguladoras clasifican como carcinógeno humano. El peligro para la salud asociado con la exposición al cromo depende de su estado de oxidación, que va desde la baja toxicidad de la forma metálica hasta la alta toxicidad de la forma hexavalente. Alguna vez se pensó que todos los compuestos que contenían  $\text{Cr}^{+6}$  eran artificiales, con solo  $\text{Cr}^{+3}$  naturalmente ubicuo en el aire, el agua, el suelo y los materiales biológicos. Recientemente, sin embargo, el  $\text{Cr}^{+6}$  natural se ha encontrado en aguas subterráneas y superficiales a valores que exceden el límite de la Organización Mundial de la Salud para el agua potable de 50  $\mu\text{g}$  de  $\text{Cr}^{+6}$  por litro (27).

#### **2.2.1.4. Usos del Cromo**

El cromo se usa ampliamente en numerosos procesos industriales y, como resultado, es un contaminante de muchos sistemas ambientales. Los compuestos de cromo comercialmente se usan en soldadura industrial, cromado, tintes y pigmentos, curtido de cuero y preservación de madera. El cromo también se usa como anticorrosivo en sistemas de cocción y calderas (28).

### **2.2.2. MECANISMOS DE TOXICIDAD DEL CROMO**

Los principales factores que rigen la toxicidad de los compuestos de cromo son el estado de oxidación y la solubilidad. Los compuestos de  $\text{Cr}^{+6}$  que son poderosos agentes oxidantes y, por lo tanto, tienden a ser irritantes y corrosivos, parecen ser mucho más tóxicos sistémicamente que los compuestos de  $\text{Cr}^{+3}$ , dada una cantidad y solubilidad similares. Aunque los mecanismos de interacción biológica son

inciertos, la variación en la toxicidad puede estar relacionada con la facilidad con que el  $\text{Cr}^{+6}$  puede pasar a través de las membranas celulares y su posterior reducción intracelular a intermedios reactivos. Dado que  $\text{Cr}^{+3}$  se absorbe mal por cualquier ruta, la toxicidad del cromo se atribuye principalmente a la forma de  $\text{Cr}^{+6}$ . Puede ser absorbido por el pulmón y el tracto gastrointestinal, e incluso hasta cierto punto por la piel intacta. La reducción de  $\text{Cr}^{+6}$  se considera como un proceso de desintoxicación cuando ocurre a una distancia del sitio objetivo para un efecto tóxico o genotóxico, mientras que la reducción de  $\text{Cr}^{+6}$  puede servir para activar la toxicidad del cromo si se produce en o cerca del núcleo celular de órganos. Si  $\text{Cr}^{+6}$  se reduce a  $\text{Cr}^{+3}$  extracelularmente, esta forma del metal no se transporta fácilmente a las células y, por lo tanto, no se observa toxicidad. El equilibrio que existe entre el  $\text{Cr}^{+6}$  extracelular y el  $\text{Cr}^{+3}$  intracelular es lo que finalmente dicta la cantidad y la velocidad a la que el  $\text{Cr}^{+6}$  puede ingresar a las células e impartir sus efectos tóxicos (28).

El  $\text{Cr}^{+6}$  ingresa a muchos tipos de células y, en condiciones fisiológicas, puede reducirse con peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), glutatión (GSH) reductasa, ácido ascórbico y GSH para producir intermedios reactivos, incluidos  $\text{Cr}^{+5}$ ,  $\text{Cr}^{+6}$ , radicales tiil, radicales hidroxilos y, en última instancia,  $\text{Cr}^{+3}$ . Cualquiera de estas especies podría atacar el ADN, las proteínas y los lípidos de membrana, interrumpiendo así la integridad y las funciones celulares (28).

#### **a. Fauna**

Los estudios con modelos animales también han reportado muchos efectos nocivos de  $\text{Cr}^{+6}$  en mamíferos. La administración subcutánea de  $\text{Cr}^{+6}$  a ratas causó proteinuria progresiva severa, nitrógeno ureico y creatinina, así como elevación en la actividad de alanina amino transferasa sérica y formación de peróxido de lípidos hepáticos. (28)

#### **b. Flora**

El cromo hexavalente provoca daños al sistema radicular en diversas partes de las plantas, en la avena se ha comprobado que las raíces no crecen y las hojas se ensanchan, presentando una pigmentación pardo-rojiza con aparición de pequeñas manchas necróticas (28).

#### **c. Recurso Hídrico**

En el recursos hídrico el cromo hexavalente tiene una gran capacidad para disolverse sin embargo cuando el agua presenta gran materia orgánica oxidable el cromo hexavalente se reduce a cromo trivalente compuesto menos



inestable e hidrosoluble, asimismo la temperatura, pH y dureza del agua influyen en el grado de toxicidad de los componentes (28).

**d. Carcinogenicidad**

Se han informado efectos adversos para la salud inducidos por  $\text{Cr}^{+6}$  en humanos. Las investigaciones epidemiológicas han reportado cánceres respiratorios en trabajadores expuestos ocupacionalmente a compuestos que contienen  $\text{Cr}^{+6}$ . Las roturas de la cadena de ADN en los linfocitos periféricos y los productos de peroxidación lipídica en la orina observados en trabajadores expuestos al cromo también respaldan la evidencia de toxicidad inducida por  $\text{Cr}^{+6}$  para los humanos. Se considera que el daño oxidativo es la causa subyacente de estos efectos genotóxicos, incluidas las anomalías cromosómicas y la rotura de la cadena de ADN. Sin embargo, estudios recientes indican una relevancia biológica de los mecanismos no oxidativos en la carcinogénesis  $\text{Cr}^{+6}$  (29) (30).

La carcinogenicidad parece estar asociada con la inhalación de los compuestos  $\text{Cr}^{+6}$  menos solubles / insolubles. La toxicología de  $\text{Cr}^{+6}$  no reside con la forma elemental. Varía mucho entre una amplia variedad de compuestos  $\text{Cr}^{+6}$  muy diferentes. La evidencia epidemiológica apunta fuertemente a  $\text{Cr}^{+6}$  como el agente en la carcinogénesis. La solubilidad y otras características del cromo, como el tamaño, la modificación de los cristales, la carga superficial y la capacidad de fagocitarse, pueden ser importantes para determinar el riesgo de cáncer (25) (31) (32).

**2.2.3. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES QUE CONTIENEN CROMO:**

Existen diferentes métodos de tratamiento sobre la remoción de cromo hexavalente los cuales se mencionan a continuación:

### 2.2.3.1. Tratamiento Biológico

#### Degradación Biológica

La degradación biológica es un proceso que permite la descomposición de contaminantes gracias a la acción de microorganismos ya sea bacterias, hongos u otros (33).

Se sabe que el  $\text{Cr}^{+6}$  es muchas veces más tóxico que el  $\text{Cr}^{+3}$ . Por lo tanto, la reducción de  $\text{Cr}^{+6}$  a  $\text{Cr}^{+3}$  por bacterias es un fenómeno muy importante en términos de control de la contaminación ambiental. La reducción microbiana de  $\text{Cr}^{+6}$  a  $\text{Cr}^{+3}$  es un proceso seguido por bacterias para la reducción de  $\text{Cr}^{+6}$  es diferente en las células bacterianas aerobias y anaerobias. (34).

Se descubrió que *Shewanella spp* es potencialmente aplicable para su uso en la remediación de  $\text{Cr}^{+6}$  tóxico y otros contaminantes metálicos mientras que la tasa rápida de  $\text{Cr}^{+6}$  directa y mediada por  $\text{Fe}^{+2}$  la reducción por *Shewanella spp* parece convertirlo en una opción útil para su uso en la biorremediación de cromato (35)

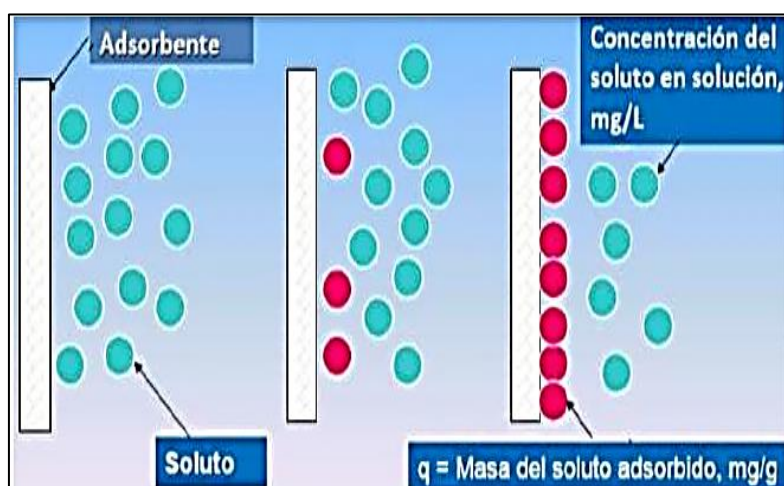
Algunas bacterias como el *Desulfomacculum* reducen y la cepa *Pantoea agglomerans*sp-1 podría usar  $\text{Cr}^{+6}$  como un receptor de electrones para el crecimiento anaeróbico, mientras que otros tienen citocromos a saber, varias especies de *Pseudomonas* *Escherichia coli* y *Shewanella oneidensis* cepa MR-1 que reducen el  $\text{Cr}^{+6}$  (35).

### 2.2.4. TRATAMIENTO QUÍMICOS

#### a. Adsorción

La adsorción es un proceso superficial que conduce a la transferencia de una molécula de un volumen de fluido a una superficie sólida. Esto puede ocurrir debido a fuerzas físicas o por enlaces químicos (36).

**Figura 1: Proceso básico de adsorción**



**Fuente: BARKAT, M. [et al.] Los estudios de cinética y termodinámica realizan la adsorción de iones de cromo hexavalente en el carbón activado de una solución acuosa” (37)**

Entre estos métodos, la biosorción merece una atención especial debido a su relativa simplicidad y bajo costo. Se han realizado muchos estudios utilizando diferentes materiales naturales para la eliminación del cromo, incluida la cáscara de naranja, almidón de patata modificados, quitosano, residuos que contiene quitina y nanofibras poliméricas. Varios otros investigadores han probado materiales compuestos principalmente de calcita como dolomita, cáscara de huevo y nanocarbonato de hidroxilapatita. Todos estos estudios mostraron capacidades de eliminación muy interesantes de este tipo de materiales carbonosos hacia el cromo: 10,01 mg/g a 50 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$  para dolomita, 9 mg/g de una solución de 2910,1 ppm de  $\text{Cr}^{+3}$  usando cáscara de huevo y 37 mg/g de una solución de 75 ppm de  $\text{Cr}^{+3}$  usando nanocarbonato de hidroxilapatita. Se informó que la eliminación del cromo se produce principalmente por reacción de intercambio con el carbonato de calcio, estos métodos son de bajo costo y amigables con el medio ambiente (38) (37).

#### **b. Precipitación Química**

La precipitación es un proceso de unidad química en el que los iones metálicos solubles indeseables y ciertos aniones se eliminan del agua o aguas residuales por conversión a una forma insoluble. Es una técnica de tratamiento comúnmente utilizada para la eliminación de metales pesados, fósforo y dureza. El procedimiento implica la alteración del equilibrio iónico para producir precipitados insolubles que pueden eliminarse fácilmente por sedimentación. La precipitación química siempre es seguida por una operación de separación

de sólidos que puede incluir coagulación y/o sedimentación, o filtración para eliminar los precipitados. El proceso puede ser precedido por reducción química para cambiar las características de los iones metálicos a una forma que pueda precipitarse (39).

El método de precipitación química utilizando  $\text{Cu}^{+2}$  se viene aplicando para la remoción de cromo hexavalente, en este tratamiento es importante evaluar la influencia de diferentes factores como la concentración inicial del cromo, pH de la solución a tratar, dosificación del precipitante y tipos de precipitantes, además de la evaluación de la influencia del tiempo de precipitación, todos los valores óptimos de estas variables pueden generar un porcentaje de remoción de cromo hexavalente de aproximadamente del 60 % (40).

**c. Resinas de Intercambio iónico**

El intercambio iónico se usa ampliamente para eliminar sales inorgánicas y componentes aniónicos orgánicos. Los materiales de intercambio iónico son capaces de intercambiar cationes e iones solubles con soluciones electrolíticas y transferirlos a lodos. La resina de intercambio iónico se puede clasificar en base a grupos funcionales como resina de intercambio aniónico, resina de intercambio catiónico y resina de intercambio quelante. Las resinas de intercambio iónico tienen una capacidad específica de absorción de compuestos metálicos y orgánicos y se usan durante el intercambio iónico. Las resinas pueden ser sintéticas o naturales. La principal desventaja es la transferencia de impurezas de la corriente de efluentes al lodo que deben eliminarse debido a los químicos de regeneración agregados. (41).

**d. Coagulación/ Floculación**

La coagulación neutraliza las cargas negativas en los sólidos no sedimentables (como la arcilla y las sustancias orgánicas productoras de color). Una vez que la carga se neutraliza, las pequeñas partículas suspendidas se desestabilizan. Estas partículas un poco más grandes se llaman microfloculos, y no son visibles a simple vista. después de la desestabilización, la floculación promueve la agregación y la formación de flóculos, generalmente después de la adición de un agente floculante apropiado. Los coagulantes comúnmente empleados son:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (28).

### **2.2.5. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS**

La electroquímica puede ofrecer mucho para resolver o aliviar problemas ambientales. Las tecnologías electroquímicas oxidativas, proporcionan versatilidad, eficiencia energética, facilidad de automatización, compatibilidad ambiental y rentabilidad, han alcanzado una etapa prometedora de desarrollo y ahora se pueden usar de manera efectiva para la destrucción de compuestos orgánicos tóxicos o biorefractoriales, las técnicas electroquímicas que se fundamenten en el uso de electrones, puede dividirse en electro flotación y electro decantación además de electrólisis y electrocoagulación; estas técnicas presentan cualidades ventajosas como son la remoción de metales pesados mediante reacciones controladas y con menores tiempos de reacción por lo cual no es necesario grandes sistemas (42).

En los últimos años el sector medioambiental ha mostrado un gran interés creciente en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales por electrocoagulación debido a su versatilidad, eficiencia de tratamiento, bajo costo y compatibilidad ambiental. Esta tecnología también se utiliza para la eliminación de metales pesados e iones inorgánicos y el tratamiento de agua potable y superficial (43).

#### **a. La Electrocoagulación**

Antes de enfocarse al proceso de electrocoagulación fue necesario la revisión de la coagulación química en vista de que este tratamiento es el referente para la electrocoagulación. El proceso de coagulación química se considera un método válido que está determinado por las especies hidrolizadas de los coagulantes inorgánicos en diferentes condiciones de agua cruda y condiciones de coagulación. Y los principales mecanismos de eliminación de metales pesados son la adsorción, la complejación y la coprecipitación (44).

La forma de obtención de iones de coagulantes es lo que caracteriza y diferencia a la electrocoagulación de la coagulación química. En la electrocoagulación, que consiste en la generación in situ de coagulantes mediante la electrodisolución de un ánodo de sacrificio, generalmente de aluminio o hierro, por lo tanto, la electrodisolución del ánodo de sacrificio en las aguas residuales conduce a la formación de productos de hidrólisis que son efectivos en la desestabilización de contaminantes y/o en la formación de partículas con solubilidad reducida que atrapan los contaminantes; por otro lado la coagulación química genera reacciones secundarias que puede desencadenar la generación de diferentes contaminantes (44).

La electrocoagulación se basa en la aplicación de una corriente eléctrica a un ánodo de sacrificio, por ejemplo, Al o Fe. Esto produce la electrodisolución de los ánodos, generando un coágulo formado por una amplia variedad de hidróxidos, oxihidróxidos e hidróxidos poliméricos de Fe o Al durante el tratamiento de aguas residuales. Este coágulo es capaz de agregar partículas suspendidas, así como desestabilizar y adsorber contaminantes disueltos o emulsionados (45).

Otros fenómenos involucrados en el proceso de electrocoagulación están asociados con la oxidación directa o indirecta de la materia orgánica y la generación de burbujas de hidrógeno en el cátodo que ayuda a la flotación de los flóculos formados. El lodo formado generalmente se separa por sedimentación y posterior filtración. Existen claras ventajas en términos de: el uso de una menor cantidad de reactivos químicos, lo que no aumenta la salinidad del agua de las aguas residuales tratadas, la generación de una menor cantidad de lodo y la facilidad de operación, automatización y menores requisitos de espacio (46) (47).

Esta técnica utiliza una fuente de corriente continua entre los electrodos metálicos sumergidos en el efluente, lo que provoca la disolución de las placas de electrodos en el efluente. Los iones metálicos, a un pH apropiado, pueden formar una amplia gama de especies coaguladas e hidróxidos metálicos que desestabilizan y agregan partículas o precipitan y adsorben los contaminantes disueltos; además del pH son importantes las variables de conductividad, el tamaño de las partículas contaminantes así como su concentración (48). Entre los sectores industriales, la electrocoagulación ha demostrado una alta efectividad. Las industrias textil y galvanotécnica, así como una gran cantidad de industrias en los sectores agroalimentarios (lácteos, carne, oliva, etc.) son buenos ejemplos (49).

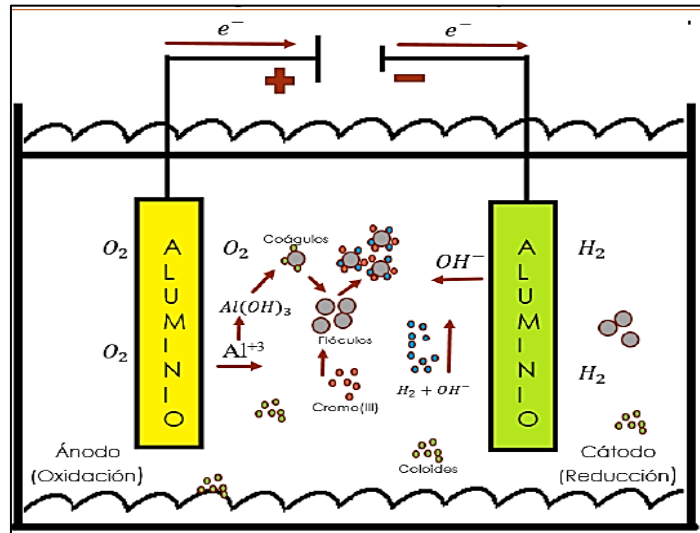
## **2.2.6. MECANISMOS Y REACCIONES DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

### **2.2.6.1. Proceso de electrocoagulación**

La electrocoagulación es el proceso de desestabilización de contaminantes suspendidos, emulsionados o disueltos en un medio análogo mediante la introducción de una corriente eléctrica en el medio.

Se puede utilizar para el tratamiento de aguas residuales donde se aplica voltaje a los electrodos, generalmente de hierro o de aluminio, y el electrolito es agua o aguas residuales (50).

**Figura 2: Sistema de electrocoagulación con ánodo y cátodo de aluminio**



**Fuente: ARROYO, M. “Tratamiento de disoluciones que contienen cromo hexavalente mediante electrocoagulación con ánodos de aluminio” (51)**

Un proceso de electrocoagulación involucra tres etapas sucesivas:

**a. Generación de coagulantes insitu**

Los metales tóxicos y los cationes de hidróxido de metal participan en el proceso de electrocoagulación, en el que se genera coagulante in situ mediante la disolución del metal del ánodo con la formación simultánea de iones hidroxilo y gas hidrógeno en el catódico. En su forma más simple, un reactor de electrocoagulación puede estar formado por una celda electrolítica con un ánodo y un cátodo, cuando la celda está conectada a una fuente de energía externa, el material del ánodo se corroe electroquímicamente debido a la oxidación. Las placas metálicas conductoras se conocen comúnmente como electrodos de sacrificio y pueden estar hechas del mismo o de diferentes materiales como el electrodo de Fe y Al/Fe (51).

**b. Desestabilización de los contaminantes, suspensión de partículas y rompimiento de las emulsiones**

Las placas de metal consumibles, como Fe o Al, generalmente se usan como electrodos de sacrificio para producir continuamente iones en el agua. Los iones liberados neutralizan las cargas de las partículas, iniciando así la coagulación. Los iones liberados eliminan contaminantes no deseados, ya sea por reacción química y precipitación o haciendo que los materiales coloidales se unan, que luego pueden eliminarse por flotación. Además, a medida que el agua que contiene partículas coloidales, aceites u otros contaminantes se mueve a través del campo eléctrico aplicado, puede haber ionización, electrólisis, hidrólisis y formación de radicales libres que pueden alterar las propiedades físicas y químicas del agua y los contaminantes. Como resultado, el estado reactivo y excitado hace que los contaminantes se liberen del agua y se destruyan o se vuelvan menos solubles (50).

El ánodo metálico produce cationes, los cuales desestabilizan las partículas coloidales mediante el desarrollo de complejos de polihidróxido polivalente. Estos complejos tienen altas propiedades de adsorción, formando agregados con contaminantes. La evolución de los gases de hidrógeno y oxígeno ayuda en la mezcla y floculación. El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, la suspensión de partículas y la ruptura de las emulsiones que tienen lugar en un reactor de electrocoagulación se puede resumir de la siguiente manera: (50)

Compresión de la doble capa difusa alrededor de las especies cargadas por las interacciones de iones generados por la oxidación del ánodo de sacrificio (50).

Neutralización de la carga de las especies iónicas presentes en las aguas residuales por contra iones generados por la disolución electroquímica del ánodo de sacrificio. Estos iones contrarios reducen la reacción electrostática entre partículas en la medida en que predomina la atracción de Van der Waals, lo que provoca la coagulación (50).



El flóculo se forma como resultado de la coagulación y crea una capa de lodo. El agua también se electroliza en una reacción paralela, produciendo pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas se adhieren a las partículas floculadas y las hacen más ligeras para flotar a la superficie a través de la flotabilidad natural (50).

#### **2.2.6.2. Reacciones producidas en el reactor de electrocoagulación**

Las reacciones químicas se dan lugar en un reactor de electrocoagulación que presenta electrodos de aluminio (52).

##### **2.2.6.2.1. Reacción de electrólisis**

La electrólisis es el proceso químico que descompone las sustancias presentes en una solución presente en una celda electrolítica al aplicar corriente eléctrica, en este caso el electrocoagulador (53). Durante la electrólisis producida en la electrocoagulación se da lugar a una serie de procesos químicos y físicos explicados a continuación (44):

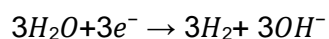
En la celda electroquímica están dispuestos una serie de electrodos conectados con carga positiva y negativa (54).

Los electrodos proporcionan iones positivos (Cation) o negativos (Anión), así que ocurre una serie de reacciones que dependen del material del electrodo (54)

El ánodo o electrodo de sacrificio, provee iones metálicos positivos, la placa metálica se disuelve, y genera ión  $Al^{+3}$  por oxidación electrolítica, este ión cumple la función de coagulante (44).



El cátodo permanece sin disolverse, por la electrólisis este rompe la molécula de agua y forma radicales hidroxilos ( $OH^{-}$ ) y átomos de hidrogeno ( $H^{+}$ ) (54).



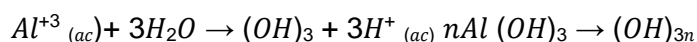
El  $Al^{+3}$  junto con el radical hidroxilo ( $OH^-$ ) se unen en soluciones alcalinas es decir un pH mayor a 7 para formar la especie coagulante llamada hidróxido de aluminio  $Al(OH)_3$  (54).



El hidróxido de aluminio actúa como coagulante y este desestabiliza las cargas de las partículas contaminantes presentes en la solución a tratar mediante la neutralización de las cargas superficiales logrando que se adhieran a él y se formen los coágulos (54) (44).

El electrodo de sacrificio forma iones de  $Al^{+3}$  provocado por las reacciones generadas in situ, estos iones cumplen la función de coagulante en el proceso de electrocoagulación (54).

Cuando las cargas se neutralicen, comienza el proceso de coagulación, ya que los sistemas se neutralizan y mantiene las partículas en suspensión (54) (44).



El proceso de electrocoagulación se rige de acuerdo a la ley de Faraday, las ecuaciones presentadas a continuación están basadas en el equilibrio de la cantidad de voltaje que se suministra y la cantidad de sustancias formadas en un electrodo asimismo cuando existe una relación estequiométrica de los moles de las sustancias formadas en el electrodo y la cantidad de electricidad suministrada al sistema (54).

$$m = I * \frac{t}{96500} * \frac{M}{n}$$

m = masa de la sustancia producida en el electrodo (g)

I = corriente eléctrica (A)

t = tiempo transcurrido (s)

$M$  = Masa molar de la sustancia (g mol)

$n$  = número de valencia de la sustancia como ión en la solución ( $e^-/\text{mol}$ )

Se desencadena un proceso de eliminación de contaminantes por reacciones químicas en donde se logró precipitar y suspender flocs (54) (44).

## 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **Afluente:** agua contaminada generada en los diferentes proceso de las industrias y que entra a un proceso de tratamiento (55).
- **Analito:** componente o especie química de una muestra que es de interés en un procedimiento analítico (38).
- **Anión:** ion que ha ganado electrones y por lo tanto presenta una carga negativa (37).
- **Ánodo:** electrodo desde el cual los electrones salen al sistema produciéndose el fenómeno de oxidación (56).
- **Ánodo o electrodo de sacrificio:** metal altamente activo debido a su electronegatividad, este metal o electrodo se consume con el fin de proteger a otro electrodo menos activo (56).
- **Capacidad buffer:** moles de ácido o base necesario para cambiar el pH de una solución (40).
- **Carga contaminante:** masa de un contaminante en un volumen definido de agua (mg/L, ppm), carga de contaminante descargado en un cuerpo receptor en un periodo de tiempo (41).
- **Cátodo:** electrodo que atrae carga positiva o cationes, debido a su carga negativa generando el fenómeno de reducción asimismo es la estructura que protege el ánodo (56).
- **Catión:** partícula o ion carga con cargas positivas y que presenta más protones que electrones (37).
- **Celda electroquímica:** es un dispositivo que genera energía eléctrica a partir de las reacciones químicas que se producen en él, tienen dos electrodos conductores, llamados ánodo y cátodo. El ánodo se define como el electrodo donde se produce la oxidación. (36).

- **Coagulación:** Es un proceso químico para eliminar partículas en forma suspendida o coloidal. Estas partículas no se depositan en reposo y no pueden eliminarse mediante procesos convencionales de tratamiento físico. (42).
- **Conductividad:** habilidad que presentan algunos material para conducir la electricidad (43).
- **Contaminación:** introducción de contaminantes en un ambiente natural, dichos contaminantes pueden ser generados por las actividades humanas y generan daños a la salud de las personas asimismo deterioran los ecosistema (44).
- **Voltaje eléctrico:** tensión eléctrica o diferencia de potencial, cuantifica la fuerza que se genera entre dos puntos, es energía potencial eléctrica por unidad de carga (56).
- **Eficiencia del tratamiento:** relación de la diferencia de la concentración de un contaminante en el afluente con la concentración del mismo contaminante en el efluente entre la concentración inicial del contaminante, esta resultados se expresa en porcentaje (55).
- **Efluente:** liquido de descarga generado después de un proceso productivo o de un tratamiento (55).
- **Electrocoagulación:** La tecnología ofrece una alternativa al uso de sales metálicas o polímeros y la adición de polielectrolitos para romper emulsiones y suspensiones estables. La tecnología elimina metales, sólidos y partículas coloidales, y contaminantes inorgánicos solubles de medios acuosos mediante la introducción de especies de hidróxido de metal altamente cargadas mediante el suministro de energía eléctrica (37).
- **Electrodo:** conductor eléctrico que forma parte de un circuito, el material que lo constituye generalmente es un metal como el Fe, Al o Cu (46).
- **Electrolito:** es un compuesto químico que se disocia en iones cuando están en una solución y, por lo tanto, es capaz de transportar carga eléctrica cuando están en una solución (47).
- **Espectroscopia UV-Visible:** medición de la atenuación (debilitamiento de la fuerza) de un haz de luz después de que pasa a través de una muestra o después de la reflexión desde una superficie de muestra. La luz ultravioleta y la luz visible son lo suficientemente energéticas como para promover los electrones externos a subniveles de mayor energía, Es otra técnica que se ha utilizado ampliamente en química analítica para la caracterización, identificación y análisis cuantitativo. (49).

- **Flóculo:** acumulación de las partículas desestabilizadas caudas por la acción de coagulantes (42).
- **Fuerzas de Wan der Walls** Las interacciones entre moléculas sin afectar su estructura molecular y pueden ser repulsivas o atractivas dependiendo de la distancia entre los átomos y las moléculas que no están unidos entre sí (57).
- **Iones:** átomos o moléculas que gana o pierden electrones (37).
- **Límite de detección:** método analítico indica cuán baja se puede decir que se mide una concentración por un instrumento, debería determinarse ejecutando un calibrador cero o una muestra en blanco 20 veces y luego determinando la media y la desviación estándar (58).
- **Pasivación:** es la pérdida de reactividad química experimentada por ciertos metales y aleaciones de metales en condiciones ambientales particulares (58).
- **Planta piloto:** pequeño sistema industrial que se opera para generar información sobre el comportamiento del sistema para su uso en el diseño de instalaciones más grandes. (55).
- **Reactor tipo Batch:** es un sistema cerrado sin flujo continuo de reactivos que ingresan al sistema o productos que salen del sistema mientras se produce la reacción (59).
- **Rendimiento energético:** es la proporción de la energía convertida por el trabajo realizado (47).
- **Resistencia Eléctrica:** es la oposición al flujo de corriente en un circuito eléctrico: la resistencia convierte la energía eléctrica en energía térmica, y en este sentido es similar a la fricción mecánica (46)
- **Solución sintética:** La solución consiste en dos o más sustancias disueltas en forma líquida, dicha solución pretende reemplazar a otras sustancias, o está constituido por sustancias artificiales (47).
- **Técnica analítica:** el conjunto de técnicas que permiten conocer cualitativa y/o cuantitativamente la composición de cualquier material y estado químico en el que se encuentra (43).
- **Técnica de colorimetría:** es una técnica científica que se usa para determinar la concentración de compuestos coloreados en soluciones mediante la aplicación de la ley de Beer-Lambert, que establece que la concentración de un soluto es proporcional a la absorbancia (42).

- **Tiempo de residencia o retención hidráulica:** es una medida del tiempo promedio que un compuesto soluble permanece en un biorreactor construido, habitualmente se expresa como la relación de caudal y volumen (55).
- **Voltaje de celda:** diferencia de fuerza electromotriz generado entre los electrodos de una celda de electrocoagulación (41).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. MÉTODO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.1.1. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN**

###### **a. Método general de la investigación**

Según HERNANDEZ, Roberto, BAPTISTA, Pilar, FERNANDEZ, Carlos, el método científico involucra el conocimiento y la investigación científica, siendo un proceso que permite establecer las condiciones a las cuales se detallan hechos particulares, que se caracteriza por ser tentativo, demostrable, de razonamiento riguroso y observación práctica (60).

La investigación busca obtener conocimientos enfocado a sus objetivos propuestos a través de un proceso dinámico, basado en la observación, descripción, explicación y predicción de los diferentes fenómenos ocurridos, que presenta diversas categorías de complicación (60).

Esta investigación observó el uso apropiado de los tiempos de la electrocoagulación para la remoción óptima de cromo hexavalente y garantizar las mejores condiciones de un efluente residual. El presente estudio uso el método científico como método general y el cuasi experimental como método específico.

**b. Método específico de la investigación**

Los métodos específicos aplicados en la presente investigación fue la cuasi experimental y los pasos realizados se muestra a continuación:

- **PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE Cr<sup>+6</sup>**

Se buscó elaborar una solución sintética que presentó la misma concentración de cromo que las aguas residuales industriales mineras, para esto se usó K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (Dicromato de potasio), que permitió obtener soluciones con concentraciones de Cr<sup>+6</sup>, para esta preparación es importante conocer el factor gravimétrico, el cual se halló mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Factor gravimétrico} = \frac{\text{Peso del Cr en K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{Peso molecular del K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} = \frac{\text{Masa de Cr}}{\text{Masa de K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}$$
$$\text{Factor gravimétrico} = \frac{103,992 \text{ g/mol}}{294,185 \text{ g/mol}}$$

El K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> pudo presentar moléculas de agua de modo que se calentó el reactivo a 100 °C durante 24 horas, dentro de una mufla, seguidamente el reactivo seco se diluyó en agua destilada para posteriormente guárdalo en un recipiente acaramelado, esto para evitar cambios en las concentraciones de la solución de cromo hexavalente que presenta sensibilidad a la luz.

Solución madre de Cr<sup>+6</sup> 100 mg/L: En una fiola de 1000 mL, se disolvieron 0,2828 g de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> previamente secados en el horno.

Solución de Cr<sup>+6</sup>, 5 mg/L: En una fiola 50 mL se tomó la solución madre y se aforó en otra fiola de 1000 mL.

- **PREPARACIÓN DE REACTIVOS SEGÚN ASTM INTERNATIONAL**

**Método Colorimétrico:** Se basa en la medición del compuesto que presento un color rojo violeta utilizando un espectrofotómetro a 540 nm UV-visible usando el Standard Test Methods for Chromium in Water (ASTM INTERNATIONAL D1687 - 02), el rojo violeta se obtuvo con la reacción de la solución madre de Cr<sup>+6</sup> con 1,5 difenilcarbazida en medio ácido (61).



Solución Ácido Fosfórico 1:1: se pipeteó 10 mL de ácido fosfórico químicamente puro y se agregó 10 mL de agua destilada.

Solución de Difenilcarbazida: se pesó 0,025 gramos de Difenilcarbazida, y se mezcló en 10 mL de acetona químicamente puro.

#### **PROCEDIMIENTO CURVA DE CALIBRACION PARA DETERMINAR $\text{Cr}^{+6}$**

0,1 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ : se midió 0,1 mL de la solución estándar y se aforó a 100 mL en la fiola.

0,2 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ : se midió 0,1 mL de la solución estándar y se aforó a 50 mL en la fiola.

0,4 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ : se midió 0,2 mL de la solución estándar y se aforó a 50 mL en la fiola.

0,5 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ : se midió 0,5 mL de la solución estándar y se aforó a 100 mL en la fiola.

#### **CURVA DE CALIBRACIÓN**

Se transfirió 5 mL de cada una de las soluciones a pequeños vasos de precipitación y se agregó 0,2 mL de difenilcarbazida en acetona inmediatamente después se agregó 0,5 mL de la solución de ácido fosfórico (1:1) preparada.

#### **CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN TIPO BATCH**

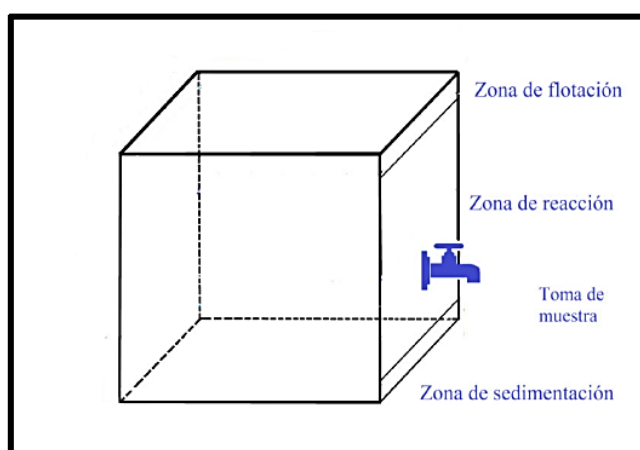
En este trabajo de grado se utilizó una celda tipo Batch (reactor) a escala prototipo, de volumen de 1,5 L para la solución a tratar. Está constituido principalmente por una celda electrolítica que consta de dos electrodos hechos de aluminio y que presentaron forma rectangular, dichos electrodos fueron sumergidos por la solución a tratar y se encuentran en forma paralela, para el proceso de electrocoagulación se suministró corriente eléctrica a través de una fuente de voltaje.

**Celda de electrocoagulación:** fue diseñada tomando en cuenta la generación de lodos, por ello la celda consto de 3 zonas, en la zona del fondo llamada zona de sedimentación (1/4 del volumen total de la celda) estuvo destinada para los lodos que precipitaran es decir los más densos, la zona del medio o zona de reacción (2/4 del volumen total de la celda) estuvo destinada para los electrodos y para la reacción o

electrocoagulación en sí y finalmente la zona superior o la zona de flotación (1/4 del volumen total de la celda) estuvo destinada para los lodos menos densos o las espumas generadas por la electrocoagulación.

A la celda se le incluyó una llave ubicada en la zona de reacciones, que sirvió para tomar alícuotas de la solución de  $\text{Cr}^{+6}$  tratada.

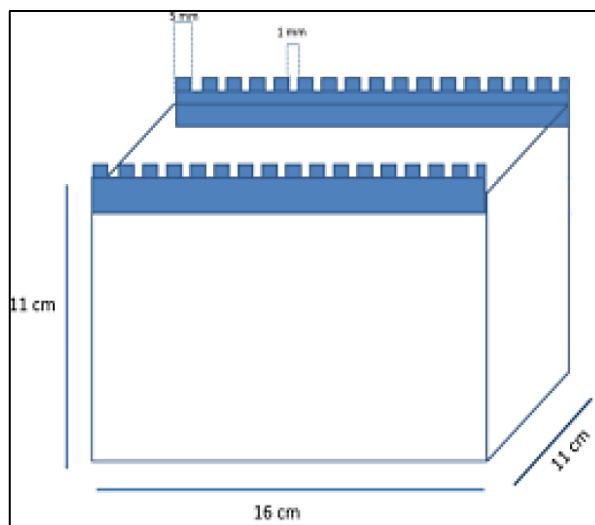
**Figura 3: Celda de electrocoagulación**



**Fuente:** Elaboración Propia

**Reactor Batch:** El reactor utilizado o la celda de electrocoagulación (ver figura 4) fue construido de material de vidrio, presenta una forma cubica con 11 cm de largo x 11 cm de alto x 16 cm de ancho; puede almacenar un volumen de solución de 1,5 L, en la parte superior presenta bordes de madera con ranuras fijas que ayudaron a sujetar cuatro electrodos, lo cuales estuvieron a una distancia de 2 cm del fondo de la celda.

**Figura 4: Dimensiones del reactor Batch**



**Fuente: Elaboración Propia**

- Fuente de alimentación: Es una fuente regulada de corriente continua (DC) de la marca BAKU 305D, con un rango de voltaje de 0 Voltios a 30 Voltios y un rango de corriente de 0 Amperios a 5 Amperios. La fuente de voltaje posee controles de corriente y voltaje regulables e independientes.
- Multímetro: El multímetro digital PRASEK PREMIUM - 301 Series y soporta un máximo de 500 V y 200 mA.
- Electrodo: el material de los electrodos es de aluminio, presentan forma de T (eficaz para adherirlo a la celda) y sus dimensiones son 9 cm de ancho x 9 cm de largo x 0,1 cm de espesor; estas dimensiones se ajustaron al tamaño de la celda. El área de contacto de los electrodos fue de 40,5 cm<sup>2</sup>.
- Espectrofotómetro: Se utilizó el equipo de marca Thermo Scientific GENESYS 20 con la capacidad de medir la absorbancia en el agua con Cr<sup>+6</sup> durante el proceso de electrocoagulación.

### **3.1.2. TIPO DE LA INVESTIGACIÓN**

Según MALAGA, Tan [et al.], la investigación aplicada ha enfocado la atención sobre solución de teorías cual concierne solo a un grupo en particular mas no generaliza, se refiere a resultados inmediatos y busca perfeccionar a los individuos implicados en el proceso de investigación (62).

La investigación planteada tiene el tipo aplicado, puesto que se utiliza métodos y conocimientos previos sobre métodos de simulación molecular, ensayos de muestras representativas, así como también la aplicación de tratamientos.

Esta investigación encontró el uso apropiado de los tiempos de electrocoagulación para la remoción de cromo hexavalente, fue validada mediante pruebas experimentales en el laboratorio de ciencias básicas de la Universidad Continental; por ello se consideró el tipo de investigación aplicada.

### **3.1.3. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN**

La investigación descriptivo - correlacional porque durante la investigación se buscó los fundamentos teóricos del proceso de electrocoagulación y las causas que generaron los diferentes procesos así como los efectos de los mismos, visto de otro modo la causas fueron encontradas en los estudios de la literatura de la investigación (postfacto), y los efectos fueron vistos durante el desarrollo experimental de la electrocoagulación y mediante la realización de la prueba de hipótesis, en base a las causas y efectos se presentaron los resultados y las conclusiones que son la consolidación de los conocimientos adquiridos (60).

En esta tesis se buscó la influencia que causa el tiempo de electrocoagulación y el voltaje eléctrico, describiendo el comportamiento de cada variable independientemente y seguidamente sus correlaciones en la remoción de cromo hexavalente, por esta razón se consideró como nivel de investigación descriptivo - correlacional.

## **3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

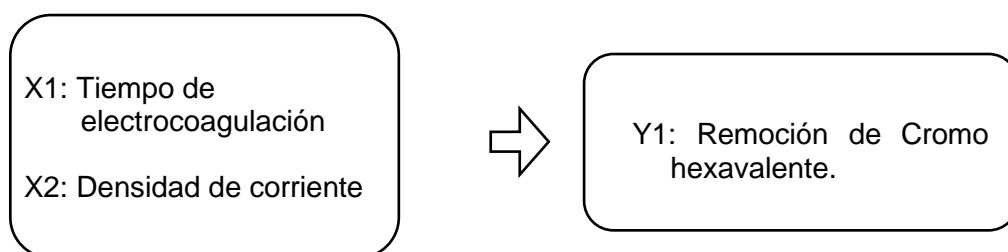
El diseño de la investigación fue un diseño cuasi experimental en la que se manipulo deliberadamente una variable independiente (tiempo o voltaje eléctrico) y se observó su efecto sobre la variable dependiente (porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ ), tomando en cuenta que los grupos a evaluar no fueron conformados al azar, sino que fueron conformados antes del experimento y se realizó tres réplicas lo cual ayudó a comparar los resultados obtenidos (60).

**Tabla 6: Variables de la investigación**

Variables	Factores	Niveles
Independiente	Factor (A): Tiempo de electrocoagulación (min)	10, 20, 30 y 40
	Factor (B): Voltaje eléctrico (voltios)	10, 15, 20 y 30
Dependiente	Porcentaje de reducción de Cr <sup>6+</sup>	---

**Fuente: Elaboración Propia**

Variable independiente: X    Variable dependiente: Y



**Tabla 7: Esquema del diseño de la investigación**

Niveles		Factor A: Voltaje eléctrico (voltios)							
		A1=10		A2=15		A3=20		A4=30	
<b>Factor B: tiempo de residencia (minutos)</b>	<b>B1=10</b>	B1A1		B1A2		B1A3		B1A4	
		B1A1	B1A1	B1A2	B1A2	B1A3	B1A3	B1A4	B1A4
		B1A1		B1A2		B1A3		B1A4	
		B2A1		B2A2		B2A3		B2A4	
	<b>B2=20</b>	B2A1	B2A1	B2A2	B2A2	B2A3	B2A3	B2A4	B2A4
		B2A1		B2A2		B2A3		B2A4	
		B3A1		B3A2		B3A3		B3A4	
		B3A1	B3A1	B3A2	B3A2	B3A3	B3A3	B3A4	B3A4
	<b>B3=30</b>	B3A1		B3A2		B3A3		B3A4	
		B4A1		B4A2		B4A3		B4A4	
		B4A1	B4A1	B4A2	B4A2	B4A3	B4A3	B4A4	B4A4
		B4A1		B4A2		B4A3		B4A4	
	<b>B4=40</b>	B4A1	B4A1	B4A2	B4A2	B4A3	B4A3	B4A4	B4A4
		B4A1		B4A2		B4A3		B4A4	

**Fuente: Elaboración Propia**

Número total de corridas experimentales= (N° de corridas base)\* (N° de réplicas)

=48

### 3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

En esta tesis se desea investigar la influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de cromo hexavalente, aplicado en una solución acuosa sintética con  $\text{Cr}^{+6}$  elaborado en el laboratorio de la Universidad Continental.

#### 3.3.1. POBLACIÓN

Soluciones acuosas sintéticas conteniendo  $\text{Cr}^{+6}$ , elaborado en la Universidad Continental.

#### 3.3.2. MUESTRA

La muestra constó de 24 pruebas a diferentes tiempos y 24 pruebas a diferentes voltajes eléctricos.

**Marco muestral:** Se tomó como muestras para esta investigación 4 alícuotas cada cierto intervalo de tiempo; a los 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos y 40 minutos; por cada voltaje eléctrico aplicado 10 voltios, 15 voltios, 20 voltios y 30 voltios.

**Técnica de muestreo:** No probabilístico, intencional.

### 3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Recopilación de información primaria para la obtención de información acerca del tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación, y la técnica de recopilación de información secundaria para la obtención de información relevante a la investigación extraída de libros, tesis referenciales y artículos científicos.

Además, se utilizó la técnica de la documentación para ello se buscó fuentes bibliográficas la recopilación de datos de interés para el estudio. Y finalmente la técnica de procesamiento de datos basado en la estadística con los softwares EXCEL, SPSS y MINITAB.

### 3.4.1. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Al realizar una investigación cuasi experimental del tipo aplicativo, se monitoreo la influencia de los factores del estudio en la variable de respuesta, asimismo se registró las absorbancias que presentaron las soluciones de  $\text{Cr}^{+6}$  después del tratamiento, tomando en cuenta la guía del laboratorio, a esto se les sumo la revisión de fuentes bibliográficas (libros, informes de tesis, revistas y otros).

### 3.4.2. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y TRATAMIENTO DE DATOS

#### Tratamiento de datos

Primero, para el tratamiento de datos se recopiló información sustancial para la elaboración del reactor y sus componentes, segundo se elaboró los reactivos a utilizar para obtener el color rojo violeta y poder realizar la lectura en el espectrofotómetro, tercero se realizó la curva de calibración graficando la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  versus la absorbancia hallando la pendiente, intercepto y coeficiente de correlación y se remplazó en la ecuación de la recta, cuarto se aplicó el diseño experimental para hallar las mejores condiciones de funcionamiento del reactor tipo Batch aplicando los distintos tiempos y voltajes a las soluciones acuosas. Asimismo, se hicieron observaciones y conclusiones con fundamentos teóricos concernientes al tema de investigación.

**Tabla 8: Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

<b>Técnica</b>	<b>Instrumento</b>
Recopilación de información	Repositorio digitas de tesis de universidades nacionales y extranjeras
	Biblioteca electrónica científica en línea SciELO, IESSK, ELSEVIER
Tratamiento estadístico	SPSS, EXCEL, MINITAB

**Fuente: Elaboración Propia**

Finalmente, para el análisis estadístico, para que, a través de la existencia de correlación entre el tiempo y  $\text{Cr}^{+6}$ , voltaje eléctrico y  $\text{Cr}^{+6}$ , finalmente entre el tiempo y el voltaje eléctrico, determinaremos la influencia del proceso de

electrocoagulación con reactor tipo Batch en la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  en soluciones acuosas.

### **Procedimiento para la recolección de datos**

- Elaboración de tablas y graficas en el programa MS EXCEL
- Para la comprobación de las hipótesis de acuerdo al diseño cuasi experimental lo primero que se realizó fueron diagramas de dispersión de  $\text{Cr}^{+6}$  vs tiempo y diagramas de dispersión de  $\text{Cr}^{+6}$  vs voltaje eléctrico, esto se realizó con el fin de obtener el coeficiente de correlación; seguidamente se realizó pruebas de normalidad, para lo cual se halló el valor de Sig con la prueba Shapiro Willks; finalmente se realizó una prueba de correlación de Spearman tanto para la primera hipótesis específica como para la segunda hipótesis específica.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO

##### 4.1.1. PREPARACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN

Para hallar la curva de calibración se prepararon soluciones con diferentes concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  a partir de la solución madre tal como se explica en el capítulo anterior, estas soluciones fueron sometidas a un análisis de espectrofotometría en el laboratorio de ciencias básicas de la universidad Continental para determinar la banda de absorción que presenta cada concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  (ver tabla 9).

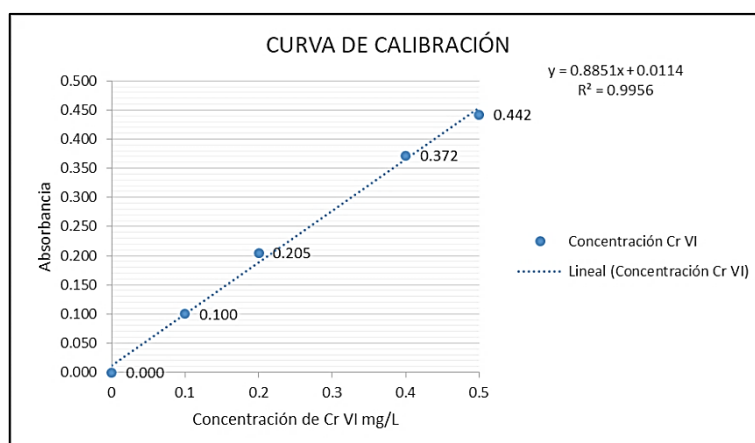
**Tabla 9: Absorbancia de las distintas concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$**

	Capacidad Fiola	mL solución madre de $\text{Cr}^{+6}$	Concentración de $\text{Cr}^{+6}$ (ppm)	Absorbancia
1	100 mL	0 mL	0 ppm	0
2	100 mL	0,1 mL	0,1 ppm	0,100
3	50 mL	0,1 mL	0,2 ppm	0,205
4	50 mL	0,2 mL	0,4 ppm	0,372
5	100 mL	0,5 mL	0,5 ppm	0,442

**Fuente: Elaboración Propia**

En la tabla 9 se observa la absorbancia por cada concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  registrada por el espectrofotómetro; en base a la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  y su absorbancia se graficó una curva de calibración presentada en la figura 5.

**Figura 5: Curva de calibración para las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  y sus respectivas absorbancias**



**Fuente: Elaboración propia**

La curva de calibración presentada en la figura 5 ayudó a plantear una ecuación de regresión lineal, a partir de dicha ecuación se estableció la siguiente fórmula:

$$\text{Concentración de } \text{Cr}^{+6} = \frac{\text{Absorbancia} - 0.0114}{0.8851} * 20 \quad [1]$$

Esta fórmula permitió determinar la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  en las soluciones que fueron sometidas a electrocoagulación, es importante mencionar que a la fórmula se le multiplicó por 20 debido a que se diluyó 20 veces las muestras tratadas para medir la absorbancia en el espectrofotómetro.

#### 4.1.2. PARÁMETROS INICIALES DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

La elección del parámetro inicial de la muestra se eligió con referencia al trabajo de investigación de ANCO, Percy, quien analizó la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  del efluente de un tratamiento interno realizado en la Compañía Minera Raura, tal como se muestra en la tabla N° 1, se tomó como referencia la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  de 2,8 mg/L, sin embargo, para que exista mayor consistencia y notoriedad en el tratamiento se duplico la concentración a 5,6 mg/L, es decir 5ppm.

Se preparó soluciones con concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  de 5,6 ppm, sin embargo, antes de empezar cada tratamiento se halló su absorbancia y en base a esto se determinó la concentración inicial de  $\text{Cr}^{+6}$  de la solución a tratar, aplicando la fórmula [1].

Tabla 10: Concentración inicial de  $\text{Cr}^{+6}$

Concentración Inicial $\text{Cr}^{+6}$	Voltaje eléctrico	Absorbancia	$\text{Cr}^{+6}$ mg/L	$\text{Cr}^{+6} \times 20$ mg/L
Tratamiento 1	10 V	0,255	0,27522314	5,50446277
Tratamiento 2	15 V	0,240	0,2582759	5,16551802
Tratamiento 3	20 V	0,235	0,25262682	5,05253644
Tratamiento 4	30 V	0,243	0,26166535	5,23330697

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 10 presenta la absorbancia registrada por el espectrofotómetro de cada muestra a tratar, antes del proceso de electrocoagulación, aplicando la fórmula se obtuvo una concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  a esta concentración se le multiplicó por 20 obteniendo la concentración real de  $\text{Cr}^{+6}$  en cada muestra; por lo tanto en el tratamiento 1 la concentración inicial de  $\text{Cr}^{+6}$  fue de 5,50446277 ppm, para el tratamiento 2 la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  fue de 5,16551802 ppm y 5,05253644 ppm y 5,23330697 ppm para el tratamiento 3 y 4 respectivamente.

#### 4.1.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CUATRO TRATAMIENTOS

En el tratamiento 1, se usó electrodos de aluminio en el reactor a los cuales se les suministro un voltaje eléctrico de 10 V, además se tomaron muestras cada 10

minutos hasta los 40 minutos de iniciado el proceso, estas muestras fueron analizadas en un espectrofotómetro mediante el cual se halló su absorbancia y aplicando la formula [1] se halló la concentración final de  $\text{Cr}^{+6}$ , la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido se halló mediante la siguiente formula:

concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido = concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  inicial - concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  final.

**Tabla 11: Absorbancia y concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido en el tratamiento 1**

TRATAMIENTO 1					
10 Voltios					
Tiempo	Absorbancia		$\text{Cr}^{+6}$ *20 final (ppm)	$\text{Cr}^{+6}$ removido (ppm)	Promedio de $\text{Cr}^{+6}$ removido(ppm)
10 minutos	R1	0,232	4,98474749	0,51971529	0,497
	R2	0,227	4,87176590	0,63269687	
	R3	0,24	5,16551802	0,33894475	
20 minutos	R1	0,218	4,66839905	0,83606372	1,002
	R2	0,202	4,30685798	1,19760479	
	R3	0,212	4,53282115	0,97164162	
30 minutos	R1	0,142	2,95107897	2,5533838	2,297
	R2	0,168	3,53858321	1,96587956	
	R3	0,15	3,13184951	2,37261326	
40 minutos	R1	0,141	2,92848266	2,57598012	2,516
	R2	0,145	3,01886793	2,48559485	
	R3	0,145	3,01886793	2,48559485	

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 11 se registran las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  después de los proceso de electrocoagulación a diferentes tiempos de electrocoagulación, se advierte que por cada tiempo se realizó tres réplicas dando un total de 12 resultados en el tratamiento 1; se advierte que la mayor concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido fue de 2,516 ppm cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 40 minutos, cuando el tiempo de electrocoagulación fue de tan solo 10 minutos se removió 0,497 ppm de

Cr<sup>+6</sup>, asimismo, en los tiempos de electrocoagulación de 20 minutos y 30 minutos la concentración de Cr<sup>+6</sup> removido fue de 1,002 ppm y 2,297 ppm respectivamente.

Los resultados obtenidos en el tratamiento 2, que presenta como condición de operación un voltaje eléctrico de 15 V, se muestran en la tabla 12.

**Tabla 12: Absorbancia y concentración de Cr<sup>+6</sup> removido en el tratamiento 2**

		TRATAMIENTO 2		
		15 voltios		
Tiempo	Absorbancia	Cr <sup>+6</sup> *20 (ppm)	Cr <sup>+6</sup> removido (ppm)	Promedio de Cr <sup>+6</sup> removido (ppm)
10 minutos	0,186	3,94531691	1,220201107	1,235
	0,189	4,01310586	1,152412157	
	0,181	3,83233533	1,333182691	
20 minutos	0,166	3,49339058	1,672127443	1,958
	0,150	3,13184951	2,033668512	
	0,144	2,99627161	2,169246413	
30 minutos	0,055	0,98519941	4,180318608	4,173
	0,054	0,96260310	4,202914925	
	0,057	1,03039205	4,135125974	
40 minutos	0,045	0,75923624	4,406281776	4,467
	0,046	0,78183256	4,383685459	
	0,036	0,55586939	4,609648627	

**Fuente: Elaboración Propia**

Las muestras tratadas en la celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio fueron analizadas en un espectrofotómetro registrándose los resultados en la tabla 12, utilizando estas absorbancias y aplicando la formula [1] se halló las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> removido que también se muestran en la tabla 11, a partir de estos resultados se infiere que la menor concentración de Cr<sup>+6</sup> removido registrada en la muestra tratada fue de 1,235 ppm, concentración obtenida cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 10 minutos, sin embargo al aumentar el tiempo de electrocoagulación la concentración de Cr<sup>+6</sup> removido aumenta alcanzando un valor de 4,467 ppm en un tiempo de 40 min.

Los resultados del experimento 3 a condiciones de operación de voltaje eléctrico de 20 voltios suministrados a electrodos de Al se presentan en la tabla 13.

**Tabla 13: Absorbancia y concentración de Cr<sup>+6</sup> removido en el tratamiento 3**

	TRATAMIENTO 3			
	20 voltios			
Tiempo	Absorbancia	Cr <sup>+6</sup> *20 (ppm)	Cr <sup>+6</sup> removido (ppm)	Promedio de Cr <sup>+6</sup> removido (ppm)
10 minutos	0,086	1,68568523	3,366851203	3,081
	0,098	1,95684104	3,095695402	
	0,112	2,27318947	2,779346966	
20 minutos	0,057	1,03039205	4,02214439	3,894
	0,063	1,16596995	3,88656649	
	0,068	1,27895153	3,773584906	
30 minutos	0,041	0,66885098	4,383685459	4,354
	0,037	0,57846571	4,474070726	
	0,049	0,84962151	4,202914925	
40 minutos	0,023	0,26211728	4,790419162	4,753
	0,024	0,28471359	4,767822845	
	0,027	0,35250254	4,700033894	

**Fuente: Elaboración Propia**

Como se puede apreciar en la tabla 13 al igual que en las tablas 11 y 12 se realizaron tres réplicas por cada 10 minutos en que se sacó la muestra para analizarla en el espectrofotómetro, la mayor absorbancia registrada por el espectrofotómetro fue de 0,112, valor que siendo aplicado en la fórmula [1] da una mayor concentración de Cr<sup>+6</sup> después del tratamiento que fue de 2,27318947 ppm a los 10 minutos, en contraste la menor absorbancia registrada por el espectrofotómetro fue de 0,023 valor que siendo aplicado a la fórmula [1] se obtuvo una concentración final de Cr<sup>+6</sup> de 0,26211728 ppm, en base a estos resultados se infiere que conforme pasa el tiempo la concentración de Cr<sup>+6</sup> disminuye y por ende la concentración de Cr<sup>+6</sup> removido aumenta.

Finalmente se realizó un último tratamiento, el tratamiento 4, el cual tuvo como condición de operación un voltaje eléctrico de 30 voltios, los resultados registrados por el espectrofotómetro, la concentración final de  $\text{Cr}^{+6}$  hallados mediante la fórmula [1] y la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido se presentan en la tabla 14.

**Tabla 14: Absorbancia y concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido en el tratamiento 4**

	TRATAMIENTO 4			
	30 voltios			
Tiempo	Absorbancia	$\text{Cr}^{+6} \times 20$ (ppm)	$\text{Cr}^{+6}$ removido (ppm)	Promedio de $\text{Cr}^{+6}$ removido (ppm)
10 minutos	0,054	0,962603096	4,270703875	4,271
	0,055	0,985199412	4,248107558	
	0,053	0,940006779	4,293300192	
20 minutos	0,036	0,555869393	4,677437578	4,534
	0,046	0,781832561	4,45147441	
	0,045	0,759236244	4,474070726	
30 minutos	0,012	0,013557790	5,219749181	5,179
	0,018	0,149135691	5,08417128	
	0,007	0	5,233306971	
40 minutos	0,005	0	5,233306971	5,233
	0,002	0	5,233306971	
	0,003	0	5,233306971	

**Fuente: Elaboración Propia**

Los resultados de las tres replicas realizadas en el tratamiento 4 se presentan en la tabla 14, se observa que las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  fueron reduciendo conforme pasaba el tiempo, se advierte en esta tabla que para los 40 minutos de electrocoagulación las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  son de 0 ppm, significando una mayor eficiencia del proceso, las absorbancias registradas en este tiempo para las réplicas I, II y III fueron de 0,005, 0,002 y 0,003 respectivamente, aplicando la fórmula [1] con estos valores se obtuvieron concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  negativas (véase anexo 3), en vista de que una concentración no puede adoptar valores negativos se les consideró como una concentración de 0 ppm, por otro lado las

concentraciones más altas de  $\text{Cr}^{+6}$  removidos halladas en el tratamiento 4 se observan cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 30 minutos y de 40 minutos, obteniéndose una concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  de 5,179 ppm cuando el tiempo fue de 30 minutos y 5,233 ppm cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 40 minutos.

Para comparar mejor el comportamiento de las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  después del proceso de electrocoagulación del tratamiento 1, 2, 3 y 4 a los diferentes tiempos, se graficó un diagrama de dispersión, que se basó en los promedios de las tres réplicas realizadas por cada tratamiento, valores presentados en la tabla 15.

**Tabla 15: Promedio de la concentración removida de  $\text{Cr}^{+6}$  obtenidos en cada tratamiento**

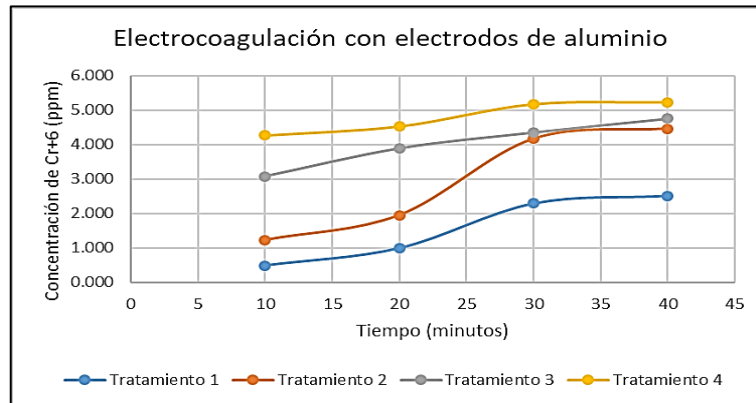
	Promedio de $\text{Cr}^{+6}$ final (ppm)			
Tiempo (min)	Tratamiento 1 (10 V)	Tratamiento 2 (15 V)	Tratamiento 3 (20 V)	Tratamiento 4 (30 V)
10	0,497	1,235	3,081	4,271
20	1,002	1,958	3,894	4,534
30	2,297	4,173	4,352	5,179
40	2,516	4,467	4,753	5,233

**Fuente: Elaboración propia**

En la tabla 15 se observa la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  promedio que presento la solución de cromo hexavalente removido después del proceso de electrocoagulación, se observa que la menor concentración removida de  $\text{Cr}^{+6}$  registrado fue en el tratamiento 1 cuando se utilizó 10 voltios y después de 10 minutos de electrocoagulación en contraste se observa una remoción completa de  $\text{Cr}^{+6}$  en el tratamiento 4 cuando se utilizó 30 voltios y después de 40 minutos de electrocoagulación.



**Figura 6: Proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio a diferentes voltajes eléctricos y tiempos de electrocoagulación**



**Fuente: Elaboración propia**

Tal como se observa en la figura 6 las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  removidos fueron incrementándose conforme pasaba el tiempo de electrocoagulación, se observa que en el tratamiento 1, a los 10 minutos, la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido fue de 0,497 ppm, cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 40 minutos la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido fue de 2,516 ppm; el mismo patrón se observa en el tratamiento 2 se advierte que a los 10 minutos, la concentración del  $\text{Cr}^{+6}$  removido fue de 1,235 ppm y a los 40 minutos la concentración removida fue de 4,467 ppm, en el tratamiento 3 que en un tiempo de electrocoagulación de 40 minutos se logró remover 4,753 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ , finalmente el tratamiento 4 sigue el mismo patrón que los tratamientos anteriores removiendo 5,233 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$  después de 40 minutos de electrocoagulación.

#### **4.1.4. RESULTADOS DE LA RELACIÓN DE VOLTAJE ELÉCTRICO Y TIEMPO Y LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CROMO.**

Para obtener la eficiencia de remoción de cromo o porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  se utilizó la siguiente formula:

$$\% \text{ de remoción de } \text{Cr} + 6 = \frac{i-f}{i} * 100 \quad [2]$$

Donde:

i= concentración inicial de  $\text{Cr}^{+6}$  en el agua sintética

f= concentración final de  $\text{Cr}^{+6}$  después de los tratamientos de electrocoagulación

**Tabla 16: Porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  logrado en los 4 tratamientos**

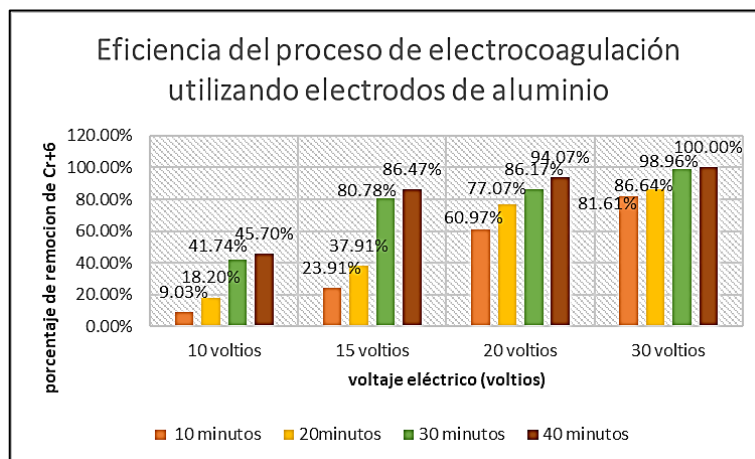
		Porcentaje de remoción de $\text{Cr}^{+6}$			
		10 voltios	15 voltios	20 voltios	30 voltios
10 minutos	R1	9,44 %	23,62 %	66,64 %	81,61 %
	R2	11,49 %	22,31 %	61,27 %	81,17 %
	R3	6,16 %	25,81 %	55,01 %	82,04 %
20 minutos	R1	15,19 %	32,37 %	79,61 %	89,38 %
	R2	21,76 %	39,37 %	76,92 %	85,06 %
	R3	17,65 %	41,99 %	74,69 %	85,49 %
30 minutos	R1	46,39 %	80,93 %	86,76 %	99,74 %
	R2	35,71 %	81,36 %	88,55 %	97,15 %
	R3	43,10 %	80,05 %	83,18 %	100,00 %
40 minutos	R1	46,80 %	85,30 %	94,81 %	100,00 %
	R2	45,16 %	84,86 %	94,36 %	100,00 %
	R3	45,16 %	89,24 %	93,02 %	100,00 %

**Fuente: Elaboración Propia**

Los resultados presentados en la tabla 10 fueron obtenidos a partir de la aplicación de la fórmula [2] utilizando los resultados de los tratamientos presentados anteriormente, en esta tabla se compara en paralelo el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  logrado mediante la interacción de los voltajes eléctricos y el tiempo de electrocoagulación, por lo tanto se observa que la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  completa se logró cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 40 minutos y el voltaje eléctrico fue de 30 voltios, en ambos casos son los niveles mayores por cada factor, en contraste observando los resultados obtenidos cuando se aplicó un menor tiempo y menor voltaje eléctrico el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  no paso de un valor de 11,49 %, cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 20 minutos y el voltaje eléctrico fue de 15 voltios, el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  se incrementó hasta un 41, 99 % y este valor se incrementó aún más hasta 88,55 % cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 30 minutos y el voltaje eléctrico

fue de 20 voltios, por lo tanto como se observa en la tabla 16 los porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  fueron incrementándose conforme se incrementaba el tiempo de electrocoagulación y el voltaje eléctrico era mayor; esta relación se puede observar en la figura 7.

**Figura 7: Eficiencia del proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio a diferentes voltajes eléctricos y tiempos de electrocoagulación**



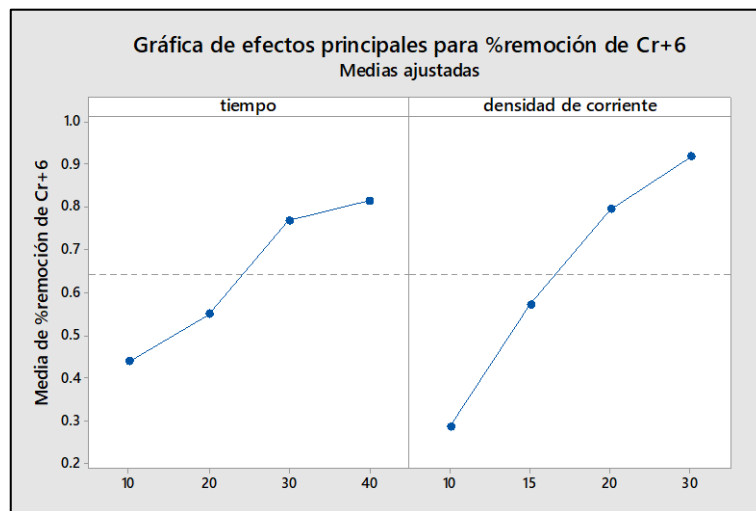
**Fuente: Elaboración Propia**

Tal como se observa en la figura 7, se puede inferir que el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  fue directamente proporcional al voltaje eléctrico y al tiempo de electrocoagulación en un tratamiento de electrocoagulación con electrodos de aluminio, se observa que se alcanzó un 100 % como porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 40 minutos y el voltaje eléctrico fue de 30 voltios, cuando el voltaje eléctrico fue de 10 voltios solo se alcanzaron porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  de 9,03 %, 18,20 %, 41,74 % y 45,70 % a los tiempos de 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos y 40 minutos respectivamente, observándose que a medida que pasa el tiempo el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  es mayor, el mismo patrón se observa en los demás tratamiento, observándose que con una densidad e corriente de 15 voltios los porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  fueron de 23,91 %, 37,91 %, 80,78 % y 86,47 % a los tiempos de 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos y 40 minutos respectivamente; en el tratamiento 3 los porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  logrados fueron de 60,97 %, 77,07 %, 86,17 % y 94,07 % porcentajes logrados en un tiempo de

electrocoagulación de 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos y 40 minutos respectivamente.

Para analizar el comportamiento de las variables independientes en el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  se realizó la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción para el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  presentados en las figuras 8 y 9.

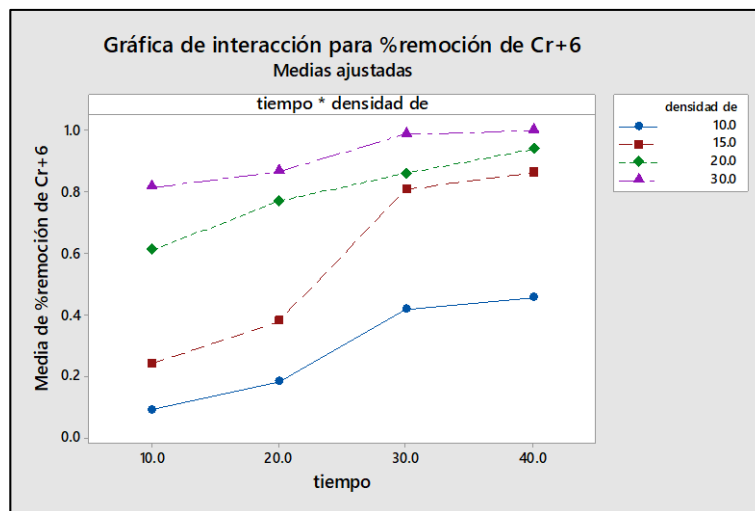
**Figura 8: Gráfica de efectos principales para el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$**



**Fuente: Elaboración Propia**

Los efectos del tiempo de electrocoagulación y voltaje eléctrico en el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  se graficaron y se presentaron en la figura 8, tal como se observa tanto el tiempo y el voltaje eléctrico lograron mejores porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  a medida que se incrementaban sus valores, en general cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 10 minutos se alcanzó un porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  que osciló entre 40 % y 50 % en contraste cuando el tiempo de electrocoagulación aumento hasta 40 minutos, el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  osciló entre 80 % y 90 %; con respecto a el voltaje eléctrico suministrada a los electrodos de aluminio cuando el voltaje eléctrico fue de 10 voltios el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  osciló entre 20 % y 30 % a medida que el voltaje eléctrico se incrementó en los diferentes tratamiento el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  logrado también se incrementó alcanzando un porcentaje de remoción mayor a 90 % cuando el voltaje eléctrico fue de 30 voltios.

Figura 9: Gráfica de efectos principales para el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$



Fuente: Elaboración Propia

El efecto de la interacción del tiempo de electrocoagulación y voltaje eléctrico se representaron en la figura 9, en dicha figura se representa que interacción de efectos logró un mayor porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ , observándose que la interacción que logró porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  de hasta el 100 % fue cuando el voltaje eléctrico fue de 30 voltios en un tiempo de electrocoagulación de 40 minutos, en contraste la interacción de efectos que logró un menor porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  inferior al 20 % fue cuando el voltaje eléctrico fue de 10 voltios y el tiempo de electrocoagulación fue de 10 minutos.

## 4.2. PRUEBA DE HIPÓTESIS.

### 4.2.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

#### Primera hipótesis específica

H1: La variación del tiempo de electrocoagulación con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

H0: La variación del tiempo de electrocoagulación con reactor tipo Batch no influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

Para la contrastación de la primera hipótesis específica se utilizaron las concentraciones de cromo hexavalente removido versus tiempo, tal como se muestra en la tabla 17.

**Tabla 17: Cromo hexavalente removido en diferentes tiempos por cada tratamiento**

	10 voltios	15 voltios	20 voltios	30 voltios
Tiempo (min)	Cr <sup>+6</sup> Removido			
10	0,51971529	1,22020111	3,3668512	4,27070388
10	0,63269687	1,15241216	3,0956954	4,24810756
10	0,33894475	1,33318269	2,77934697	4,29330019
20	0,83606372	1,67212744	4,02214439	4,67743758
20	1,19760479	2,03366851	3,88656649	4,45147441
20	0,97164162	2,16924641	3,77358491	4,47407073
30	2,5533838	4,18031861	4,38368546	5,21974918
30	1,96587956	4,20291492	4,47407073	5,08417128
30	2,37261326	4,13512597	4,20291492	5,23330697
40	2,57598012	4,40628178	4,79041916	5,23330697
40	2,48559485	4,38368546	4,76782284	5,23330697
40	2,48559485	4,60964863	4,70003389	5,23330697

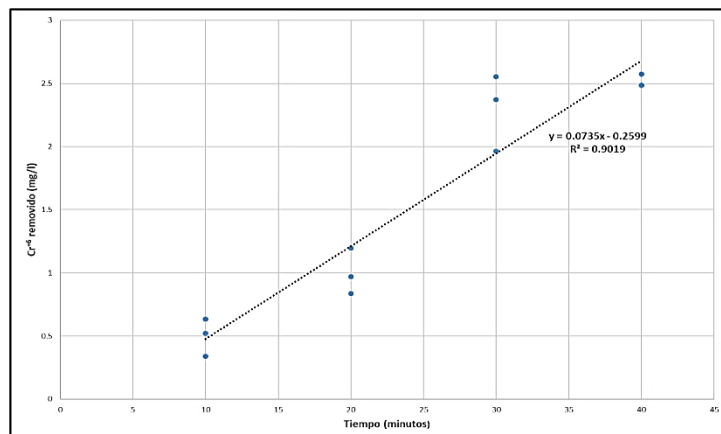
**Fuente: Elaboración Propia**

Con los datos presentados en la tabla 17 se realizó diagramas de dispersión por cada voltaje eléctrico empleado, con el fin de relacionar la concentración de Cr<sup>+6</sup> removido con los tiempos empleados en el proceso de electrocoagulación, esta relación se determinó con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), distinguiendo si los datos se ajustan a una línea recta, es importante tener en cuenta que el coeficiente de determinación se encuentra dentro del rango (63):

$$0 < R^2 < 1$$

A continuación, se presenta el diagrama de dispersión de la concentración de Cr<sup>+6</sup> removido en relación a los diferentes tiempos de electrocoagulación, cuando al proceso de electrocoagulación se le suministro un voltaje eléctrico de 10 voltios.

**Figura 10: Diagrama de dispersión del Cr<sup>+6</sup> removido vs tiempo (10 voltios)**

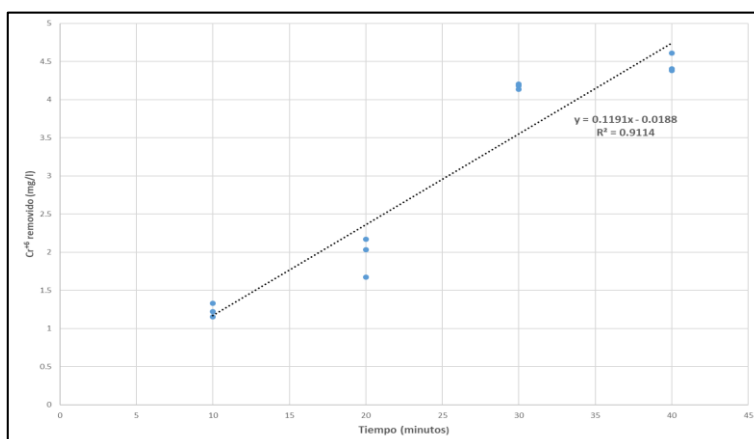


**Fuente: Elaboración Propia**

En relación a lo presentado en la figura 10 se observa que los datos se ajustaron a una ecuación de regresión, presentando como coeficiente de determinación un valor de 0,9019 al ser un valor próximo a 1 se infiere que el 90,19 % de la varianza observada en las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> removidos es explicada por el modelo de regresión lineal de  $y = 0,0735 x - 0,2599$ .

El diagrama de dispersión para las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> removidos cuando se suministró 15 voltios al reactor tipo Batch, en función al tiempo se presenta en la figura 11.

**Figura 11: Diagrama de dispersión del Cr<sup>+6</sup> removido vs tiempo (15 voltios)**

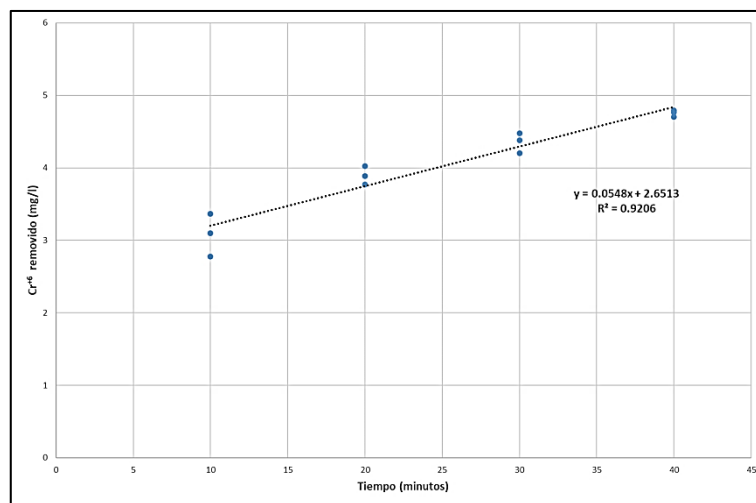


**Fuente: Elaboración Propia**

En la figura 11 se observa una ecuación de regresión de  $y = 0,1191 x - 0,0188$ , que presenta un coeficiente de determinación de 0,9114, este valor da a entender que un 91,14 % de la variación observada en las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  removidos es explicada por el modelo de regresión.

El diagrama de dispersión para las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  removidos cuando al proceso de electrocoagulación se le suministro 20 voltios se presentan en la figura 12.

**Figura 12: Diagrama de dispersión del  $\text{Cr}^{+6}$  removido vs tiempo (20 voltios)**



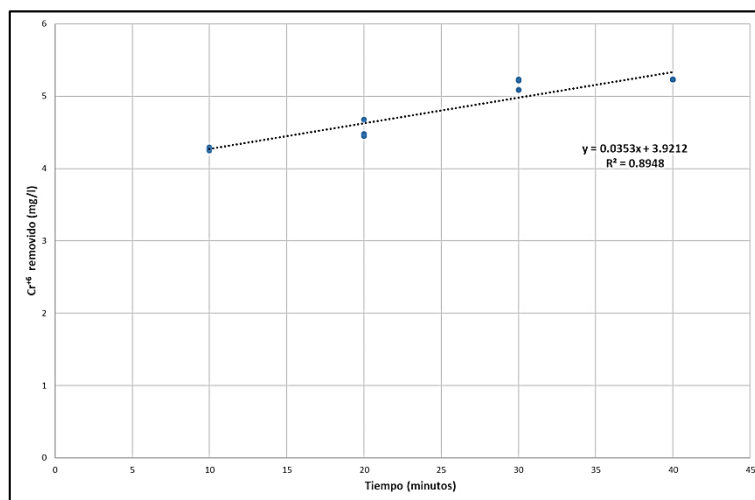
**Fuente: Elaboración Propia**

En la figura 12 se presenta la ecuación de regresión lineal para la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido en función del tiempo siendo:  $y = 0,0548 x + 2,6513$ , dicha ecuación presenta un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,9206 al estar este valor cercano a la unidad se infiere que la varianza observada en las concentraciones de cromo hexavalente removido es explicada por el modelo de regresión lineal.

Finalmente, el diagrama de dispersión para las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  removido en función del tiempo cuando se le suministro 30 voltios al proceso de electrocoagulación, se presentan en la figura 13.



**Figura 13: Diagrama de dispersión del Cr<sup>+6</sup> removido vs tiempo (30 voltios)**



**Fuente: Elaboración Propia**

El coeficiente de determinación presentado en la figura 13 es de 0,8948, valor que indica que la varianza observada en las concentraciones de cromo hexavalente removidos se ajusta a la ecuación de regresión lineal de  $y = 0,0353x + 3,9212$ .

### **Prueba de Normalidad**

Para determinar si los datos siguen una distribución de probabilidad normal se realizó las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y de Shapiro-Wilk mediante el software estadístico SPSS, obteniéndose los siguientes resultados presentados en la tabla 18

**Tabla 18: Pruebas de normalidad para las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> removido en función del tiempo por cada voltaje eléctrico empleado**

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
10 V	0,227	12	0,088	0,842	12	0,029
15 V	0,290	12	0,006	0,803	12	0,010
20 V	0,124	12	0,200	0,931	12	0,388
30 V	0,246	12	0,043	0,790	12	0,007

**Fuente: Elaboración Propia**

Para determinar la normalidad se consideró un nivel de confianza del 95 % y se planteó las siguientes hipótesis:

Ho: La distribución es normal

H1: La distribución no es normal

Cabe mencionar que si los valores de Sig (probabilidad de la prueba) son menores o iguales a la significancia 0,05 se concluye que la distribución de datos no es normal, es decir se acepta la hipótesis alterna y si es mayor se acepta que la distribución es normal, es decir se acepta la hipótesis nula.

Solo se tomó en cuenta los valores de Sig registrados en la tabla 18 para la prueba de Shapiro Wilk, considerando que es recomendable utilizar esta prueba cuando el número de datos es inferior a 50, por lo tanto, se infiere que solamente se tiene como distribución normal al caso de 20 voltios y los otros casos 10 voltios, 15 voltios y 30 voltios no tienen distribución normal por lo que se realizó una prueba no paramétrica (Spearman) para validar la correlación, tal como se muestra en la tabla 19.

**Tabla 19: Correlaciones de Rho de Spearman para las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> removido en relación al tiempo**

Correlaciones Rho de Spearman						
		tiempo	10 V	15 V	20 V	30 V
tiempo	Coefficiente de correlación	1,000	0,930	0,972	0,972	0,956
	Sig. (bilateral)		0,000	0,000	0,000	0,000
	N	12	12	12	12	12
10 V	Coefficiente de correlación	0,930	1,000	0,890	0,914	0,874
	Sig. (bilateral)	0,000	.	0,000	0,000	0,000
	N	12	12	12	12	12
15 V	Coefficiente de correlación	0,972	0,890	1,000	0,930	0,911
	Sig. (bilateral)	0,000	0,000	.	0,000	0,000
	N	12	12	12	12	12
20 V	Coefficiente de correlación	0,972	0,914	0,930	1,000	0,904
	Sig. (bilateral)	0,000	0,000	0,000	.	0,000
	N	12	12	12	12	12
30 V	Coefficiente de correlación	0,956	0,874	0,911	0,904	1,000
	Sig. (bilateral)	0,000	0,000	0,000	0,000	.
	N	12	12	12	12	12

Fuente: Elaboración Propia

Tal como se muestra en la tabla 19 se utilizó una prueba de correlación de Spearman, utilizado cuando el número de pares de sujetos que se deben asociar es menor de 30, esta correlación determina el grado de asociación entre dos variables, asimismo determina la dependencia o independencia entre dos variables aleatorias (60).

Es importante mencionar que el coeficiente de correlación de Spearman presenta un rango desde -1 hasta +1, identificando que si el coeficiente es cercano a +1 existe una fuerte asociación positiva entre las dos variables, si se encuentra cercano a -1 se infiere que existe una fuerte asociación negativa entre las variables y si el coeficiente de correlación es de 0 se infiere que no existe correlación (60).

La correlación de Spearman también presenta una hipótesis nula y alternativa para establecer si existe o no una correlación entre dos variables, las hipótesis serían:

Ho: No existe correlación entre dos variables

H1: Si existe correlación entre dos variables

Trabajando con un nivel de confianza del 95 % si el Sig es menor o igual 0,05 se rechaza a la hipótesis nula y se acepta la alterna.

En vista de que los coeficientes de correlación tomaron valores de 1 o cercanos a 1 tal como se muestra en la tabla 19 se infiere que existe una correlación o asociación positiva fuerte, basándose en esta afirmación y observando los valores de Sig que presento valores de 0,000 menor al nivel de significancia, se acepta que existe una correlación entre las dos variables por lo cual se acepta que la variación del tiempo de electrocoagulación con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

### **Segunda hipótesis específica**

H0: La variación del voltaje eléctrico con reactor tipo Batch no influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

H1: La variación del voltaje eléctrico con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

Para la contrastación de la segunda hipótesis específica se utilizaron las concentraciones de cromo hexavalente removido versus voltaje eléctrico, tal como se muestra en la tabla 20.

**Tabla 20: Cromo hexavalente removido cuando se utilizó diferentes voltajes eléctricos**

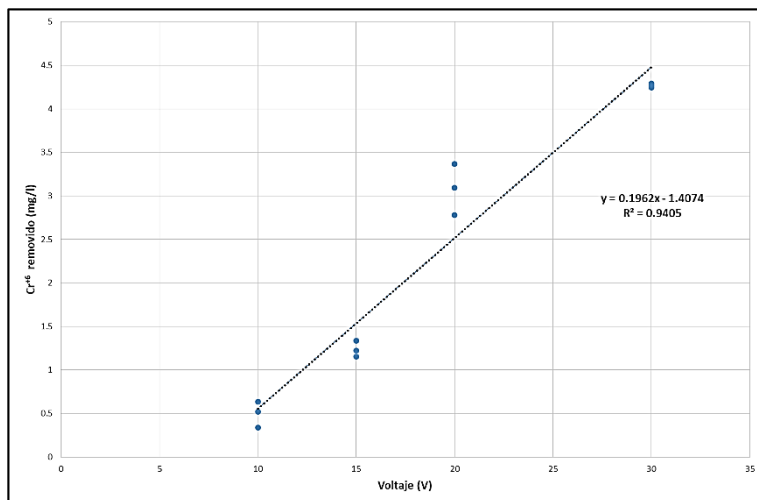
	10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
Voltaje eléctrico (V)	$\text{Cr}^{+6}$ Removido			
10	0,51971529	0,83606372	2,5533838	2,57598012
10	0,63269687	1,19760479	1,96587956	2,48559485
10	0,33894475	0,97164162	2,37261326	2,48559485
15	1,22020111	1,67212744	4,18031861	4,40628178
15	1,15241216	2,03366851	4,20291492	4,38368546
15	1,33318269	2,16924641	4,13512597	4,60964863
20	3,3668512	4,02214439	4,38368546	4,79041916
20	3,0956954	3,88656649	4,47407073	4,76782284
20	2,77934697	3,77358491	4,20291492	4,70003389
30	4,27070388	4,67743758	5,21974918	5,23330697
30	4,24810756	4,45147441	5,08417128	5,23330697
40	4,29330019	4,47407073	5,23330697	5,23330697

**Fuente: Elaboración Propia**

Con los datos presentados en la tabla 20 se realizó diagramas de dispersión por cada tiempo de electrocoagulación empleado, con el fin de relacionar la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido con los voltajes eléctricos, esta relación se determinó con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), distinguiendo si los datos se ajustan a una línea recta.

A continuación, se presenta el diagrama de dispersión de la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido en relación a los diferentes voltajes eléctricos, cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 10 minutos.

**Figura 14: Diagrama de dispersión del Cr<sup>+6</sup> removido vs voltaje eléctrico (10 minutos)**

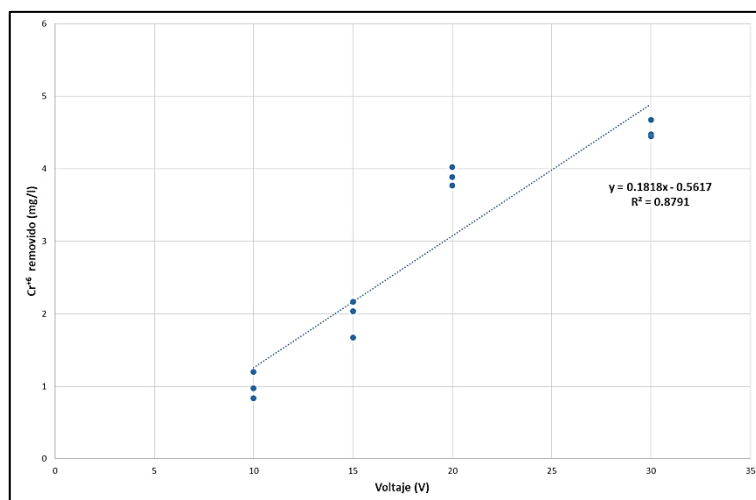


**Fuente: Elaboración Propia**

En relación a lo presentado en la figura 14 se observa que los datos se ajustaron a una ecuación de regresión, presentando como coeficiente de determinación un valor de 0,9405 al ser un valor próximo a 1 se infiere que el 94,05 % de la varianza observada en las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> removidos es explicada por el modelo de regresión lineal de  $y = 0,1962x - 1,4074$ .

El diagrama de dispersión para las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> en función al voltaje eléctrico se presenta en la figura 15.

**Figura 15: Diagrama de dispersión del Cr<sup>+6</sup> removido vs voltaje eléctrico (20 minutos)**

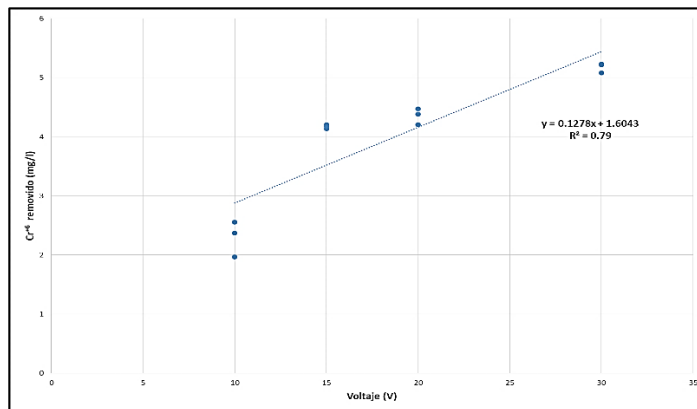


**Fuente: Elaboración Propia**

En la figura 15 se observa una ecuación de regresión de  $y = 0,1818x - 0,5617$ , que presenta un coeficiente de determinación de 0,8791, este valor da a entender que un 87,91 % de la variación observada en las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  removidos es explicada por el modelo de regresión.

El diagrama de dispersión para las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  removidos en función al voltaje eléctrico, cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 30 minutos, se presentan en la figura 16.

**Figura 16: Diagrama de dispersión del  $\text{Cr}^{+6}$  removido vs voltaje eléctrico (30 minutos)**

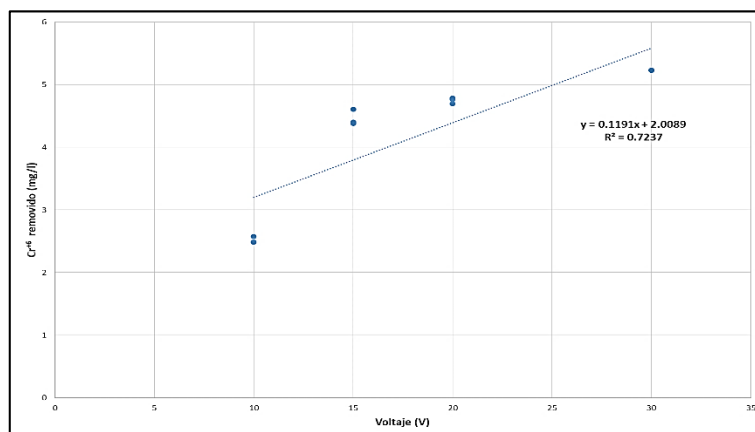


**Fuente: Elaboración Propia**

En la figura 16 se presenta la ecuación de regresión lineal para la concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  removido en función del voltaje eléctrico, siendo:  $y = 0,1278x + 1,6043$ , dicha ecuación presenta un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,79, valor menor a los mostrados en las tablas anteriores, sin embargo, a pesar de eso dicho valor es mayor a 0,5 por lo cual se infiere que la varianza observada en las concentraciones de cromo hexavalente removido es explicada por el modelo de regresión lineal.

Finalmente, el diagrama de dispersión para las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  removido en función al voltaje eléctrico cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 40 minutos, se presentan en la figura 17.

**Figura 17: Diagrama de dispersión del Cr<sup>6+</sup> removido vs voltaje eléctrico (40 minutos)**



**Fuente: Elaboración Propia**

El coeficiente de determinación presentado en la figura 17 es de 0,7237, valor que indica que la varianza observada en las concentraciones de cromo hexavalente removidos se ajusta a la ecuación de regresión lineal de  $y = 0,1191x + 2,0089$ .

### **Prueba de Normalidad**

Para determinar si los datos siguen una distribución de probabilidad normal se realizó las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y de Shapiro-Wilk mediante el software estadístico SPSS, obteniéndose los siguientes resultados presentados en la tabla 21

**Tabla 21: Pruebas de normalidad para las concentraciones de Cr<sup>6+</sup> removido en función del voltaje eléctrico por cada tiempo de electrocoagulación empleado**

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
10 min	0,226	12	0,092	0,868	12	0,062
20 min	0,232	12	0,074	0,867	12	0,059
30 min	0,298	12	0,004	0,853	12	0,040
40 min	0,302	12	0,003	0,768	12	0,004

**Fuente: Elaboración Propia**

Para determinar la normalidad se consideró un nivel de confianza del 95 % y se planteó las siguientes hipótesis:

Ho: La distribución es normal

H1: La distribución no es normal

Cabe mencionar que si los valores de Sig (probabilidad de la prueba) son menores o iguales a la significancia 0,05 se concluye que la distribución de datos no es normal, es decir se acepta la hipótesis alterna y si es mayor se acepta que la distribución es normal, es decir se acepta la hipótesis nula.

Solo se tomó en cuenta los valores de Sig registrados en la tabla 21 para la prueba de Shapiro Wilk, se infiere que solamente se tiene como distribución normal al caso de 30 y 40 minutos los datos no son normales y los otros casos 10 y 20 minutos no tienen distribución normal por lo que se realiza una prueba no paramétrica (Spearman) para validar la correlación., tal como se muestra en la tabla 22.

**Tabla 22: Correlaciones de Rho de Spearman para las concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$  removido en relación al voltaje eléctrico**

Correlaciones Rho de Spearman						
		tiempo	10 V	15 V	20 V	30 V
tiempo	Coeficiente de correlación	1,000	0,972	0,972	0,963	0,980
	Sig. (bilateral)		0,000	0,000	0,000	0,000
	N	12	12	12	12	12
10 V	Coeficiente de correlación	0,972	1,000	0,979	0,935	0,981
	Sig. (bilateral)	0,000	.	0,000	0,000	0,000
	N	12	12	12	12	12
15 V	Coeficiente de correlación	0,972	0,979	1,000	0,932	0,963
	Sig. (bilateral)	0,000	0,000	.	0,000	0,000
	N	12	12	12	12	12
20 V	Coeficiente de correlación	0,963	0,935	0,932	1,000	0,947
	Sig. (bilateral)	0,000	0,000	0,000	.	0,000
	N	12	12	12	12	12
30 V	Coeficiente de correlación	0,980	0,981	0,963	0,947	1,000
	Sig. (bilateral)	0,000	0,000	0,000	0,000	.
	N	12	12	12	12	12

Fuente: Elaboración Propia



Tal como se muestra en la tabla 22 se utilizó una prueba de correlación de Spearman, para determinar el grado de asociación entre dos variables.

La correlación de Spearman también presenta una hipótesis nula y alternativa para establecer si existe o no una correlación entre dos variables, las hipótesis serían:

Ho: No existe correlación entre dos variables

H1: Si existe correlación entre dos variables

Trabajando con un nivel de confianza del 95 % si el Sig es menor o igual 0,05 se rechaza a la hipótesis nula y se acepta la alterna.

En vista de que los coeficientes de correlación tomaron valores de 1 o cercanos a 1 tal como se muestra en la tabla 22 se infiere que existe una correlación o asociación positiva fuerte, basándose en esta afirmación y observando los valores de Sig que presento valores de 0,000 menor al nivel de significancia, se acepta que existe una correlación entre las dos variables por lo cual se acepta que la variación del voltaje eléctrico con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

#### **4.2.2. HIPÓTESIS GENERAL**

H1: El proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

H0: El proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch no influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

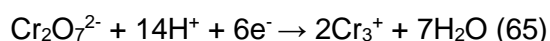
Al observar que las variables independientes de tiempo y voltaje eléctrico influyeron positivamente en la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  y al ser estas variables fundamentales en un proceso de electrocoagulación se acepta la hipótesis alterna, aceptando que el proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental – 2019.

### 4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se evaluó la influencia de la variación del tiempo y el voltaje eléctrico en la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ , tras analizar los porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  registrados en la tabla 16 y en la figura 7, se infiere que el tiempo de electrocoagulación y porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  presentaron una relación directamente proporcional, es decir a medida que el tiempo se incrementaba el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  alcanzado fue mucho mayor, por lo cual analizando el tiempo con relación a el voltaje eléctrico más alta, se logró un 81,61 % cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 10 minutos al incrementar este tiempo hasta 20 minutos el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  alcanzó un 86,64 %, este porcentaje aumento hasta 98,96 % cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 30 minutos y al dejar en contacto la solución con los electrodos de aluminio durante 40 minutos se alcanzó un porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  máximo de 100 %, este comportamiento se presenta también en el trabajo de investigación de MAYTA, Roddy y MAYTA, Jhony que estudiaron la remoción del cromo y DQO en aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación, dichos investigadores evaluaron la remoción de cromo III a diferentes tiempo de 15 minutos y 45 minutos, logrando una máxima remoción de cromo III de 97,72 % cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 45 minutos y 96,66 % cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 15 minutos (11), del mismo modo en el trabajo de ARÉVALO, César, quienes estudiaron la influencia del voltaje eléctrico y el tiempo de residencia en la reducción de As utilizando un proceso de electrocoagulación, enfocándose en el tiempo de residencia, dichos autores evaluaron el porcentaje de remoción de As a los tiempos de 15 minutos, 30 minutos, 45 minutos y 60 minutos, observando los resultados a una voltaje eléctrico de 30 mA/cm<sup>2</sup> se obtuvo un porcentaje de remoción de As próximo al 100 % cuando los tiempos de electrocoagulación fueron de 45 minutos y 60 minutos, a un tiempo de 30 minutos el porcentaje de remoción bajo hasta un aproximado de 90 % y disminuyo aún más hasta 80 % cuando el tiempo fue de 15 minutos (64), además de las investigaciones mencionada en el trabajo de investigación de BIANCA, Ana Cláudia y MARILIZ, C. Glanert, evaluaron la remoción de cromo de las aguas residuales de curtido por precipitación química y electrocoagulación, en relación al tiempo de electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio, alcanzaron un remoción eficiente de 97,76 % a los 110 minutos, este porcentaje de remoción fue disminuyendo hasta 70 % a los 80 minutos, a los 40 minutos el porcentaje de

remoción solo osciló entre 40 % y 50 %, a los 30 minutos el porcentaje de remoción osciló entre 30 % y 40 %, a los 20 minutos, el porcentaje de remoción varió entre 20 % y 30 % y a los 10 minutos el porcentaje de remoción alcanzado fue de tan solo 10 %, observándose que dichos resultados siguen una relación directamente proporcional al tiempo de electrocoagulación (18).

Es importante acotar que a un mayor tiempo de electrocoagulación permite una mayor formación de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  causado por la oxidación electrolítica de los electrodos de sacrificio y que cumple una función como coagulante, el coagulante se generó a partir de la hidrólisis espontánea del  $\text{Al}^{+3}$ , el cual se formó de la disolución electrolítica del ánodo, la formación de dicho coagulante desestabiliza las partículas de cromo y permiten la formación de flóculos, la remoción del cromo se sustenta en la siguiente reacción:



Se evaluó la influencia de la variación del voltaje eléctrico en la remoción de cromo hexavalente  $\text{Cr}^{+6}$  observándose que se obtuvieron mejores porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  conforme el voltaje eléctrico fue mayor, tal como se observa en la figura 7, en un tiempo de 10 minutos se obtuvo un porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  de 9,03 % cuando el voltaje eléctrico fue de 10 voltios, este porcentaje se incrementó hasta 23,91 % cuando el voltaje eléctrico fue de 15 voltios, al incrementar la densidad hasta 20 voltios el porcentaje de remoción alcanzado fue de 60,97 % y finalmente al utilizar una voltaje eléctrico de 30 voltios, el porcentaje de remoción alcanzado fue de 81,61 % del mismo modo cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 40 minutos el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  se incrementó a medida que el voltaje eléctrico fue mayor, obteniendo un 45,70 % cuando la densidad fue de 10 voltios, al incrementar esta densidad a 15 voltios el porcentaje de remoción alcanzo un valor de 86,47 %, al utilizar una voltaje eléctrico de 20 voltios el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  logrado fue de 94,07 % y finalmente al utilizar un voltaje eléctrico de 30 voltios se alcanzó una eficiencia completa logrando un porcentaje de remoción de 100 %, estos resultados demuestran que a mayor voltaje eléctrico se lograron mejores resultados, del mismo modo la investigación de BHAGAWAN, D. [et al.], quienes estudiaron el efecto de el voltaje eléctrico para remover cromo por electrocoagulación, evaluaron el efecto de dos densidades de corriente de 4 voltios y de 8 voltios,

obteniendo un porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  de 96 % cuando el voltaje eléctrico fue de 8 V y un porcentaje de remoción de 91 % cuando el voltaje eléctrico fue de 4 V, esto podría atribuirse a una disminución en el voltaje que disminuye directamente tanto la dosis de coagulante (19). Asimismo los investigadores EL-NAAS, Muftah y HAMDAN, Shaima, en su investigación de remoción de cromo hexavalente de agua subterránea por un proceso de electrocoagulación, evaluaron el efecto de el voltaje eléctrico variándolo desde 1,50 mA/cm<sup>2</sup> hasta 15,87 mA/cm<sup>2</sup>, observándose que a medida que el voltaje eléctrico aplicada aumenta de 1,59 mA/cm<sup>2</sup> a 7,94 mA/cm<sup>2</sup>, la eficiencia de eliminación de cromo aumenta de 37 % al 99 %, el alto voltaje eléctrico acelera la velocidad de disolución de los iones  $\text{Fe}^{+2}$  proporcionados por el material del ánodo y, por lo tanto, aumenta la velocidad de desestabilización de los contaminantes, forma una mayor cantidad de coagulante y mejora el rendimiento del proceso de electrocoagulación (20). La relación directamente proporcional de el voltaje eléctrico y la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  se presenta también en el trabajo de BAZRAFSHAN, Edris [et al.] quien removió cromo hexavalente de agua sintética mediante un proceso de electrocoagulación, utilizó tres niveles de densidad de corriente: 20 voltios, 30 voltios y 40 voltios, a una tiempo de electrocoagulación de 40 minutos se logró alcanzar un porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  de 99,90 % cuando el voltaje eléctrico fue de 20 voltios, al incrementar el voltaje eléctrico hasta 30 voltios, se alcanzó un porcentaje de remoción de 99,96 % y finalmente a los 40 voltios se logró una máximo porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  de 99,98 % (21).

## CONCLUSIONES

1. Se logró una mayor eficiencia alcanzando un 100 % de porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ , logrando remover 5,233 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$  cuando el tiempo de electrocoagulación fue de 40 minutos y el voltaje eléctrico fue de 30 voltios en el tratamiento 4.
2. Se determinó la influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  a nivel de laboratorio, empleando un reactor tipo Batch, la evaluación de la influencia se realizó utilizando dos variables independientes, los cuales fueron tiempo de electrocoagulación (10 minutos, 20 minutos, 30 minutos y 40 minutos) y voltaje eléctrico (10 voltios, 15 voltios, 20 voltios y 30 voltios), a medida que el tiempo y el voltaje eléctrico fueron mayores se incrementó el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ .
3. Se determinó la influencia de la variación del tiempo de electrocoagulación sobre la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ , obteniéndose mayores porcentajes de remoción conforme se incrementaba el tiempo de electrocoagulación, por lo cual en un tiempo de electrocoagulación de 40 minutos se logró un 100 % como máximo porcentaje de remoción de cromo hexavalente, removiendo 5,233 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ , en los tiempos de electrocoagulación de 30 minutos, 20 minutos y 10 minutos solo se alcanzó porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  de 99,74 %, 89,38 % y 82,04 % respectivamente, lo que indico que se removió una concentración de 5,179 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$  a los 30 minutos, 4,534 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$  a los 20 minutos y 4,271 ppm de  $\text{Cr}^{+6}$ , estos resultados indican que el tiempo óptimo fue de 40 minutos.
4. Se determinó la eficiencia de la variación del voltaje eléctrico en la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  mediante un proceso de electrocoagulación con electrodos de Al, concluyendo que se alcanzaron porcentajes de remoción altos conforme se incrementaba el voltaje eléctrico, analizando los resultados cuando el tiempo óptimo fue de 40 minutos se observó que el porcentaje de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  fue de 46,80 %, 89,24 %, 94,81 % y 100 % cuando los voltajes eléctricos fueron de 10 voltios, 15 voltios, 20 voltios y 30 voltios respectivamente, estos porcentajes indicaron que cuando el voltaje eléctrico fue de 10 voltios se logró remover una concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  de 2,516 ppm, cuando el voltaje eléctrico fue de 15 voltios se logró remover una concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  de 4,467 ppm, cuando el voltaje eléctrico fue de 20 voltios se logró remover una concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  de 4,753 ppm y finalmente cuando se empleó un voltaje eléctrico de 30 voltios se logró remover una concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  de 5,233 ppm,

concluyendo que el voltaje eléctrico óptimo para lograr altos porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  fue el de 30 voltios.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar el tratamiento de electrocoagulación utilizando electrodos de hierro, electrodos de aluminio y la combinación de electrodos de hierro y aluminio y además comparar la eficacia que presenta cada uno de estos materiales en la remoción de cromo.
2. Se recomienda evaluar la eficiencia del pH de la solución acuosa a tratar en un proceso de electrocoagulación para remover metales pesados.
3. Se recomienda evaluar la incidencia de la distancia de los electrodos en el proceso de electrocoagulación en el porcentaje de eliminación de metales pesados.
4. Se recomienda estudiar la eficiencia del proceso de electrocoagulación en diferentes aguas residuales como las domésticas, las industriales o en efluentes minero metalúrgico o efluentes de la industria textil.
5. Se recomienda probar el proceso de electrocoagulación en concentraciones altas de  $\text{Cr}^{+6}$  100 ppm, 500 ppm o 1000 ppm.
6. Se recomienda utilizar otros tratamientos como la precipitación química, coagulación y floculación, fotocátalisis, biopolímeros, adsorción con desechos agrícolas y realizar una comparación operacional, viabilidad económica con la electrocoagulación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **VILCHEZ, A., y otros.** Nueva cultura del agua. [En línea] 2009. [Citado el: 12 de febrero de 2019.] <http://www.oei.es/deacada/accion06.htm>.
2. **SANS, Ramon y DE PABLO, Joan.** *Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos*. s.l. : Marcombo S.A., 1989.
3. **ANCO, Percy Máximo.** *Procedimiento para la separación de cromo hexavalente de efluentes mineros*. Lima : Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2004.
4. *Contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Moche, 1980 – 2010, La Libertad – Perú.* **HUARANGA MORENO, Félix, y otros.** Trujillo : Scientia Agropecuaria , 2012, Vol. 3.
5. *Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión.* **CAVIEDES RUBIO, Diego Ivan, y otros.** 1, s.l. : Revista Ingeniería y Región., 2015, Vol. 15.
6. *Guía de tecnologías de tratamiento de aguas para su reutilización.* **GARCIA, E. y LETON, P.** 218, s.l. : Tragua Consolider, 2012. 9788469539859.
7. *Coagulation and electrocoagulation of wastes polluted with dyes.* **CAÑIZARES, Pablo, y otros.** España : Environ. Sci. Technol., 2006, Vol. 40.
8. *La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas.* **RESTREPO, Ana Patricia, ARANGO, Álvaro y GARCÉS, Luis Fernando.** 2, s.l. : Producción + Limpia, 2006, Vol. I.
9. *Water contamination from oil extraction activities in Northern Peruvian Amazonian rivers.* **YUSTA, Raúl, y otros.** 225, Brasil : Environmental Pollution, 2017.
10. **MINISTERIO DE JUSTICIA.** Aprueban límites máximos permisibles y valores referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel. *El Peruano*. 2002.
11. *Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación.* **MAYTA, Roddy y MAYTA, Jhony.** 3, s.l. : Rev Soc Quím Perú, 2017, Vol. 83.
12. **CAMARGO, Juan Pablo.** *Remoción de metales pesados presentes en aguas residuales a través del proceso de electrocoagulación*. Bogotá : Universidad Militar Nueva Granada, 2015.
13. *Tratamiento de aguas residuales mediante.* **ARANGO, Álvaro.** 1, Antioquia : J. Eng. Technol, 2014, Vol. III. 2256-3903.
14. *Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas .* **MORALES, Nelly Bibiana.** 1, Bogotá : Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 2010, Vol. xx. 0124-8170.
15. **HERNÁNDEZ, Pablo Santiago.** *Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación*. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2011.



16. **AREVALO, César.** *Influencia de la densidad de corriente y tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación.* Trujillo : Universidad Nacional de Trujillo, 2016.
17. **AGUILAR, Edwar.** *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua.* Lima : Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2015.
18. *removal of chromium from tanning wastewater by chemical precipitation and electrocoagulation.* **BIANCA, Ana Cláudia y MARILIZ, C. Glanert.** Istanbul : Congress of IULTCS, 2013, Vol. 29.
19. *Effect of operational parameters on heavy metal removal by electrocoagulation.* **BHAGAWAN, D., y otros.** Kukatpally : Environ Sci Pollut Res, 2014. 500085.
20. *Removal of hexavalent chromium from groundwater by continuous electrocoagulation.* **EL-NASS, Muftah y HAMDAN, Shaima.** Singapur : International Conference on Chemical Engineering and Application, 2014, Vol. 5.
21. *Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of chromium (VI) from synthetic chromium solutions using iron and aluminum electrodes.* **BAZRAFSHAN, Edris, y otros.** Teheran : Turkish J. Eng. Env. Sci., 2006, Vol. 32.
22. **RIVERA, N. y CÉLIKA, P.** *Implementación de reservorios como una propuesta de tecnología apropiada para mejorar la calidad sanitaria de agua para riego en Nievería.* Callao : Universidad Nacional de Callao, 2011.
23. *Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater.* **ESCOBAR, C., SOTO, C. y TORAL, I.** 4, s.l. : Journal Environmental Management, 2006, Vol. 81.
24. *Treatment of industrial wastes containing toxic metals (chromium), purification by liquid membranes.* **HASSAINE, F. y SADOUN, L.** s.l. : Desalination, 2005, Vol. 185.
25. *Remoción de contaminantes metálicos.* **LITTER, M.** s.l. : Solar Safe Water, 2005.
26. *Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri and hexavalent chromium from water.* **MOHAN, D. y PITTMAN, C.** s.l. : Journal of Hazardous Materials, 2006, Vol. 137.
27. *Purification - concentration process. Studies on the transport mechanism of a chromium (VI) - sulfuric acid-tri-n-octylamine (TOA) - ammonium carbonate system.* **SADOUN, L. y FASSAINE, S.** s.l. : Desalination, 2004, Vol. 167.
28. *Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo.* **CHÁVEZ, A.** Medellín : Revista de ingenierías Universidad de Medellín, 2010, Vol. 9.
29. *Citric acid modified agricultural by products as copper ion adsorbents.* **WATELLE, L. y MARCHALL, W.** s.l. : Advances in Environmental Research, 2000, Vol. 4.
30. *Removal of chromate from water by a new CTABsilica gelatin composite.* **VENDITTI, F., y otros.** s.l. : Journal of colloid and Interface Science, 2007, Vol. 310.

31. *Removal of chromate anions by micellar-enhanced ultrafiltration using cationic surfactants.* **GZARA, L. y DHAHBI, M.** s.l. : Desalination, 2001, Vol. 137.
32. *Removal of chromium from industrial waste by using eucalyptus bark.* **SARIN, V. y PANT, K.** s.l. : Bioresource Technology, 2006, Vol. 97.
33. *Zeolites and their application in the decontamination of mine wastewater.* **CURI, A., y otros.** 6, s.l. : Información Tecnológica, 2006, Vol. 17.
34. *Reduction of hexavalent chromium by *Sphaerotilus natans* a filamentous micro-organism present in activated sludges.* **CARAVELLI, A., GIANNUZZI, L. y ZARITZKY, N.** s.l. : Journal of Hazardous Materials, 2008, Vol. 156.
35. *Removal of Chromium from waste water with the help of microbes.* **SINGH, Asha Lata.** India : e-Journal of Science & Technology, 2008.
36. *Removal of hexavalent chromium by *Trichocerca viride* in an airlift bioreactor.* **MORALES, L. y CRISTIANI, E.** s.l. : Enzyme and Microbial Technology, 2006, Vol. 40.
37. *Kinetics and thermodynamics studies do chromium (VI) ions adsorption onto activated carbon from aqueous solution.* **BARKAT, M., y otros.** s.l. : Chemical Engineering and Processing, 2009, Vol. 48.
38. *Removal of hexavalent chromium by *Trichocerca viride* in an airlift bioreactor.* **MORALES, L. y CRISTIANI, E.** s.l. : Enzyme and Microbial Technology, 2006, Vol. 40.
39. **WANG, Lawrence K., y otros.** Chemical Precipitation. [aut. libro] L. K., HUNG, Y. T., SHAMMAS, N. K. WANG. *Physicochemical Treatment Processes.* s.l. : Humana Press, 2005, Vol. 3.
40. *Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua del cauce y en los sedimentos del río Jarama.* **ARAUZO, M., y otros.** s.l. : Asociación española de Limnología, 2003, Vol. 22.
41. *Factors affecting coremoval of chromium through cooper precipitation.* **SUN, J., y otros.** s.l. : Separation Purification Technology, 2007, Vol. 56.
42. *Application of ion-exchange resins to the fractionation of metals in water.* **PHOL, P.** s.l. : Trends in Analytical Chemistry, 2006, Vol. 25.
43. *Groundwater coagulation using soluble stainless steel electrodes.* **ABUZAID, N. y BUKHARI, A.** s.l. : Advances in Environmental Research, 2002, Vol. 6.
44. *Fundamentals, present and future perspectives od electrocoagulation.* **MOLLAH, M., y otros.** s.l. : Journa of Hazardous Materials, 2004, Vol. 114.
45. *the effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes.* **İRDMEZ, S., DEMIRCIOGLU, N. y YILDIZ, Y.** s.l. : Journal of Hazardous Materials, 2007, Vol. 137.
46. *The future of electrocoagulation as a localised water treatment technology.* **HOLT, P., BARTON, G. y MITCHELL, C.** 3, s.l. : Chemosphere, 2005, Vol. 59.
47. *Environmental electrochemistry: Fundamentals and applications in pollution abatement.* **RAJECHWAR, K. y IBANES, J.** 776, San Diego : Academic Press Limited, 1997.

48. *Electrochemical technologies in wastewater treatment*. **CHEN, G.** 1, s.l. : Separation and Purification Technology, 2004, Vol. 38.
49. *Characterization of electrocoagulation for removal of chromium and arsenic*. **PRAGA, J., y otros.** s.l. : Chemical Engineering Technology, 2005, Vol. 28.
50. *Electrocoagulation (EC) technology for wastewater treatment and pollutants removal*. **DIDAR-UI, S. M.** Bangladesh : Springer International Publishing, 2017.
51. *Tratamiento de disoluciones que contienen cromo hexavalente mediante electrocoagulación con ánodos de hierro*. **ARROYO, M.** Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, 2011.
52. *Control en línea de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales por electrocoagulación*. **DÍAZ, F. y HERNÁNDEZ, L.** Bucaramanga : Universidad Pontificia Bolivariana, 2010.
53. **CANTERA, Luis Alberto.** *Automatización del proceso de tratamiento de aguas pluviales por el método de electrocoagulación*. s.l. : Instituto Politécnico Nacional, 2013.
54. *La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*. **RESTREPO, Ana, ARANGO, Alvaro y GARCÉS, Luis.** 2, s.l. : Producción limpia, 2006, Vol. 1.
55. *Interrelations of the yeast Candida utilis and Cr(VI): metal reduction and its distribution in cell and medium*. **MUTER, O., PATMAILNIEKS, A. y RAPOPORT, A.** s.l. : Process Biochemistry, 2001, Vol. 36.
56. *Immobilized chitosan as biosorbent for the removal of Cd(II), Cr(III) and Cr(VI) from aqueous solutions*. **COPELLO, G., y otros.** s.l. : Bioresource Technology, 2008, Vol. 99.
57. **CHAU, Foo y LEUNG, Alexander.** Applications of wavelet transform in spectroscopic studies. [aut. libro] Beata Walczak. *Data handling in science and technology*. s.l. : Wavelets in Chemist, 2000.
58. **DASGUPTA, Amitava y WAHED, Amer.** Laboratory statistics and quality control. *Clinical chemistry, immunology and laboratory quality control*. s.l. : Elsevier, 2014.
59. **HAFEEZ, Sanaa, y otros.** Catalytic conversion and chemical recovery. [aut. libro] S. M. AL-SALEM. *Plastics to energy*. s.l. : Environment & Life Sciences Research Centre, 2019.
60. **HERNANDEZ, Roberto, BAPTISTA, Pilar y FERNANDEZ, Carlos.** *Metodología de la investigación*. Mexico : Mc Graw-Hill, 2010.
61. **SEVERICHE, C., CASTILLO, E. y ACEVEDO, R.** *Cromo hexavalente- manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros físicoquímicos básicos en aguas*. Cartagena de Indias : Fundación universitaria Andaluz Inca Garcilaso, 2013.
62. **MALAGA, Tan, y otros.** *Tipos y estrategias de investigación científica*. s.l. : Morata, 2008.
63. **GUTIÉRREZ, Humberto y DE LA VARA, Román.** *Análisis y diseño de experimentos*. México : Mc Graw Hill, 2010. 978-607-15-0725-9.

64. **ARÉVALO, César.** *Influencia de densidad de corriente y tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación.* Trujillo : s.n., 2016.
65. **ARBOLEDA, Juan Manuel y HERRERA, Paula Julieth.** *Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente ( $Cr^{+6}$ ) con electrodos de Al-Al y Al-Fe en condiciones de laboratorio.* Bogota : Universidad Santo Tomas, 2015.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

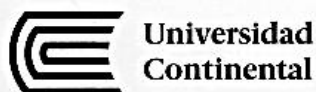
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	DIMENSIONES	VARIABLES	METODOLOGIA
<p><b>General:</b></p> <p>¿Cómo influye el proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch en la remoción de <math>Cr^{+6}</math> en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019?</p> <p><b>Específicos:</b></p> <p>¿Cómo influye la variación del tiempo de electrocoagulación con reactor tipo Batch en la remoción de <math>Cr^{+6}</math> en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019?</p> <p>¿Cómo influye la variación del voltaje eléctrico con reactor tipo Batch en la remoción de <math>Cr^{+6}</math> en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019?</p>	<p><b>General:</b></p> <p>Determinar la influencia del proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch en la remoción de <math>Cr^{+6}</math> en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019.</p> <p><b>Específicos:</b></p> <p>Determinar la influencia de la variación del tiempo de electrocoagulación con reactor tipo Batch en la remoción de <math>Cr^{+6}</math> en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019.</p> <p>Determinar la influencia de la variación del voltaje eléctrico con reactor tipo Batch en la remoción de <math>Cr^{+6}</math> en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019.</p>	<p><b>General:</b></p> <p>H<sub>1</sub>: El proceso de electrocoagulación con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de <math>Cr^{+6}</math> en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019.</p> <p><b>Específicas:</b></p> <p>H<sub>1</sub>: La variación del tiempo de electrocoagulación con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de <math>Cr^{+6}</math> en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019.</p> <p>H<sub>1</sub>: La variación del voltaje eléctrico con reactor tipo Batch influye positivamente en la remoción de <math>Cr^{+6}</math> en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental - 2019.</p>	<p><b>Proceso de Electrocoagulación</b></p> <p>Se refiere al proceso electroquímico muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales, por medio del cual se desestabilizan las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo diferentes potenciales eléctricos y distintos periodos de tiempos, a través de placas metálicas paralelas.</p> <p><b>Remoción de <math>Cr^{+6}</math></b></p> <p>Se refiere a la concentración removida de compuestos químicos como el <math>NaCr_2O_7</math>, <math>CrO_3</math> y sales de cromo y dicromato, que contienen el metal pesado, cromo, en el estado de oxidación 6, dicho metal es utilizado en diferentes procesos industriales como en la fabricación de pinturas, aleaciones de acero para evitar la oxidación, curtiembre, recubrimientos anticorrosión, así como una variedad de usos de nicho.</p>	<p><b>Variable Independiente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Proceso de electrocoagulación</li> </ul> <p><b>Dimensiones:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de electrocoagulación</li> <li>- Diferencia de potencial eléctrico</li> </ul> <p><b>Indicadores:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- minutos</li> <li>- voltios</li> </ul> <p><b>Variable Dependiente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Remoción de <math>Cr^{+6}</math></li> </ul> <p><b>Dimensiones:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de <math>Cr^{+6}</math></li> </ul> <p><b>Indicadores:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ppm <math>Cr^{+6}</math></li> <li>- % de remoción de <math>Cr^{+6}</math></li> </ul>	<p><b>Nivel de investigación:</b></p> <p>Descriptivo - Correlacional</p> <p><b>Método General y específico:</b></p> <p>Método científico y experimentación</p> <p><b>Diseño de investigación:</b></p> <p>Diseño Cuasi-experimental</p> <p><b>Tipo de investigación:</b></p> <p>Investigación aplicada</p> <p><b>Población:</b></p> <p>Solución acuosa sintética con <math>Cr^{+6}</math> elaborado en la Universidad Continental - Huancayo</p> <p><b>Muestra:</b></p> <p>24 pruebas a diferentes tiempos y 24 pruebas a diferentes voltajes</p> <p><b>Técnicas de recolección:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Corridas en el laboratorio</li> <li>- Fichas de observación</li> <li>- Elaboración curva de calibración</li> </ul> <p><b>Técnicas de procesamiento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de estándar ASTM</li> <li>- Método colorimétrico por espectrofotometría</li> </ul>

## ANEXO 2: OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

### OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	
		Dimensiones	Indicadores
<b>VI: Proceso de electrocoagulación</b>	Se refiere al proceso electroquímico muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales, por medio del cual se desestabilizan las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo diferentes potenciales eléctricos y distintos periodos de tiempos, a través de placas metálicas paralelas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de electrocoagulación</li> <li>- Diferencia de potencial eléctrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- minutos</li> <li>- voltios</li> </ul>
<b>VD: Remoción de cromo hexavalente Cr<sup>6+</sup></b>	Se refiere a la concentración de compuestos químicos como el NaCr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , CrO <sub>3</sub> y sales de cromo y dicromato, que contienen el metal pesado, cromo, en el estado de oxidación 6., dicho metal es utilizado en diferentes procesos industriales como en la fabricación de pinturas, aleaciones de acero para evitar la oxidación, curtiembre, recubrimientos anticorrosión, así como una variedad de usos de nicho.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de Cr<sup>6+</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ppm Cr<sup>6+</sup></li> <li>- % de remoción de Cr<sup>6+</sup></li> </ul>

## ANEXO 3: INFORME N°1 DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO



### CONSTANCIA

Por medio del presente la oficina de laboratorios deja constancia que el **Bach. Perales Vilchez Jean Christian** egresado de la carrera de Ingeniería Ambiental e identificado con DNI N° 47603090, ha realizado sus ensayos en los laboratorios de la Universidad Continental, desde el 02/02/2018 hasta el 02/07/2019, como parte de su investigación de tesis titulada: **"Influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental, 2019"**, cuyos resultados fueron presentados para su conocimiento de esta oficina.

Se expide la presente constancia a petición del interesado para los fines y usos que hubiere a lugar.

  
  
Corina Torres Cáceres  
Jefatura de Laboratorios de  
Ciencias Básicas  
Universidad Continental

Huancayo, 13 de agosto del 2019.



## PREPARACIÓN DE CURVA DE CALIBRACIÓN REALIZADOS DEL 02/02/2019 AL 05/03/2019

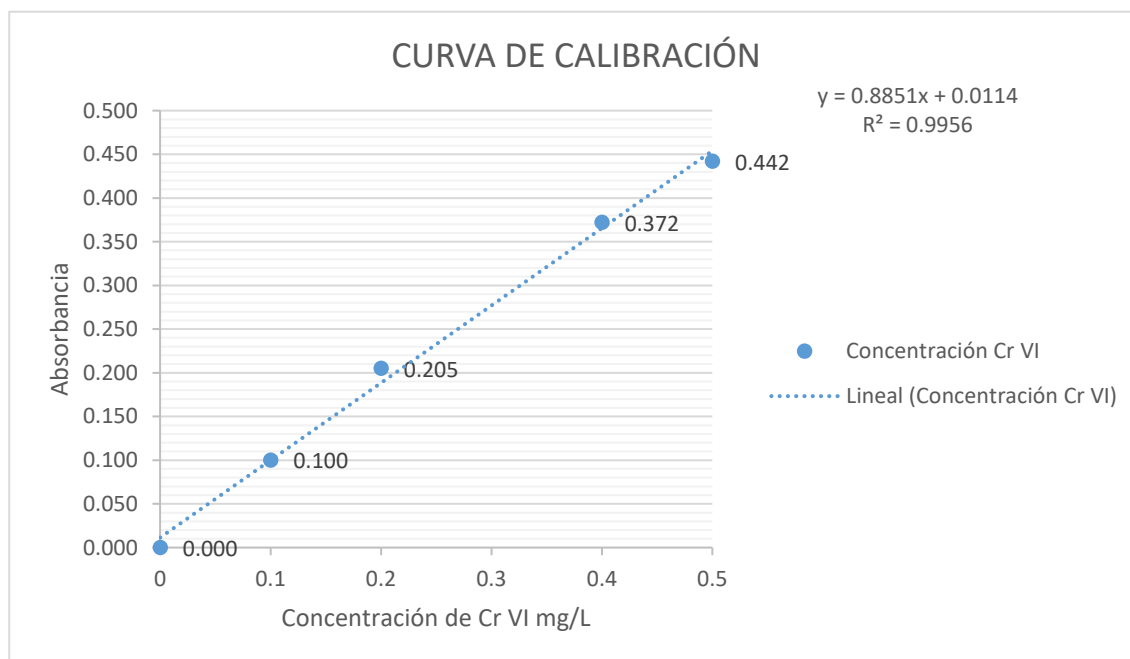
### 1. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE $\text{Cr}^{+6}$

*Solución de  $\text{Cr}^{+6}$ , 100 mg/L:* En una fiola aforado de 1000mL de agua destilada, se disuelven 0.2828 gramos de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  previamente secados en el horno.

### 2. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES ESTÁNDAR Y CURVA DE CALIBRACIÓN

Tabla N° 01

	CAPACIDAD FIOLA	ppm	mL solución de $\text{Cr}^{+6}$	ABSORBANCIA
1	100 mL	0 ppm	0 mL	0
2	100 mL	0,1 ppm	0,1 mL	0,100
3	50 mL	0,2 ppm	0,1 mL	0,205
4	50 mL	0,4 ppm	0,2 mL	0,372
5	100 mL	0,5 ppm	0,5 mL	0,442



$$\text{Concentración } \text{Cr}^{+6} = \frac{\text{ABSORBANCIA} - 0.0114}{0.8851} * 20^1$$

<sup>1</sup> Se multiplicará por 20, porque se diluirá 20 veces las muestras tratadas para medir la absorbancia en el espectrofotómetro.

### PARÁMETROS INICIALES

Tabla N° 02

Concentración Inicial Cr <sup>+6</sup>	ABSORBANCIA	Cr <sup>+6</sup> mg/L	Cr <sup>+6</sup> x 20 mg/L
Tratamiento 1	0,255	0,27522314	5,50446277
Tratamiento 2	0,240	0,2582759	5,16551802
Tratamiento 3	0,235	0,25262682	5,05253644
Tratamiento 4	0,243	0,26166535	5,23330697

### PRIMER ENSAYO REALIZADOS DEL 06/03/2019 AL 16/03/2019

Tabla N° 03

TRATAMIENTO 1			
Concentración inicial <b>5,50446277 mg/L</b>			
10 VOLTIOS			
TIEMPO	ABSORBANCIA	Cr <sup>+6</sup> *20	Cr <sup>+6</sup> removido (ppm)
10 MINUTOS	0,232	4,984747486	0,51971529
	0,227	4,871765902	0,63269687
	0,240	5,165518021	0,33894475
20 MINUTOS	0,218	4,668399051	0,83606372
	0,202	4,306857982	1,19760479
	0,212	4,53282115	0,97164162
30 MINUTOS	0,142	2,951078974	2,5533838
	0,168	3,538583211	1,96587956
	0,150	3,131849509	2,37261326
40 MINUTOS	0,141	2,928482657	2,57598012
	0,145	3,018867925	2,48559485
	0,145	3,018867925	2,48559485

### SEGUNDO ENSAYO RELIZADOS DEL 11/04/2019 AL 25/04/2019

Tabla N° 04

TRATAMIENTO 2			
Concentración inicial <b>5.16551802 mg/L</b>			
15 VOLTIOS			
TIEMPO	ABSORBANCIA	Cr <sup>+6</sup> *20	Cr <sup>+6</sup> removido (ppm)
10 MINUTOS	0,186	3,94531691	1,220201107
	0,189	4,01310586	1,152412157
	0,181	3,83233533	1,333182691
20 MINUTOS	0,166	3,49339058	1,672127443
	0,150	3,13184951	2,033668512
	0,144	2,99627161	2,169246413
30 MINUTOS	0,055	0,98519941	4,180318608
	0,054	0,9626031	4,202914925
	0,057	1,03039205	4,135125974
40 MINUTOS	0,045	0,75923624	4,406281776

	0,046	0,78183256	4,383685459
	0,036	0,55586939	4,609648627

### TERCER ENSAYO REALIZADOS DEL 04/05/2019 AL 18/05/2019

Tabla N° 05

TRATAMIENTO 3			
Concentración inicial <b>5,05253644 mg/L</b>			
20 VOLTIOS			
TIEMPO	ABSORBANCIA	Cr <sup>+6</sup> *20	Cr <sup>+6</sup> removido (ppm)
10 MINUTOS	0,086	1,685685233	3,366851203
	0,098	1,956841035	3,095695402
	0,112	2,27318947	2,779346966
20 MINUTOS	0,057	1,030392046	4,02214439
	0,063	1,165969947	3,88656649
	0,068	1,278951531	3,773584906
30 MINUTOS	0,041	0,668850977	4,383685459
	0,037	0,57846571	4,474070726
	0,049	0,849621512	4,202914925
40 MINUTOS	0,023	0,262117275	4,790419162
	0,024	0,284713592	4,767822845
	0,027	0,352502542	4,700033894

### CUARTO ENSAYO REALIZADOS DEL 26/06/2019 AL 02/07/2019

Tabla N° 06

TRATAMIENTO 4			
Concentración inicial <b>5,23330697 mg/L</b>			
30 VOLTIOS			
TIEMPO	ABSORBANCIA	Cr <sup>+6</sup> *20	Cr <sup>+6</sup> removido (ppm)
10 MINUTOS	0,054	0,962603096	4,270703875
	0,055	0,985199412	4,248107558
	0,053	0,940006779	4,293300192
20 MINUTOS	0,036	0,555869393	4,677437578
	0,046	0,781832561	4,45147441
	0,045	0,759236244	4,474070726
30 MINUTOS	0,012	0,01355779	5,219749181
	0,018	0,149135691	5,08417128
	0,007	-0,099423794	5,233306971
40 MINUTOS	0,005	-0,144616428	5,233306971
	0,002	-0,212405378	5,233306971
	0,003	-0,189809061	5,233306971

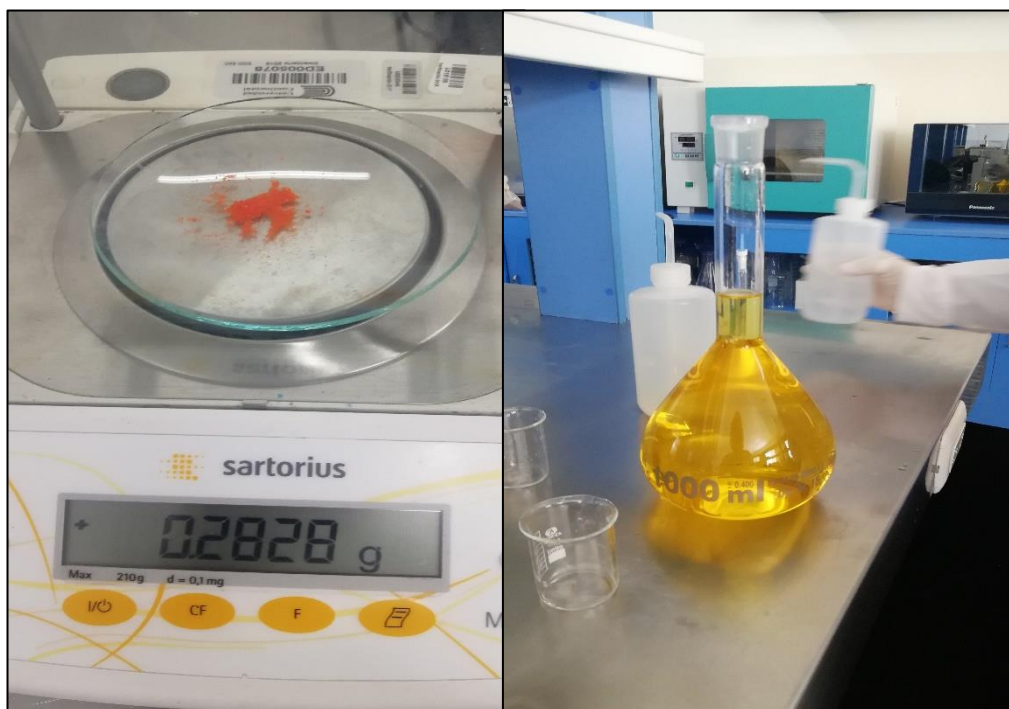
#### ANEXO 4: PESADO DEL DICROMATO DE POTASIO



## ANEXO 5: CALENTAMIENTO DEL DICROMATO DE POTASIO EN UN HORNO A 100°C



## ANEXO 6: PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN MADRE DE DICROMATO DE POTASIO

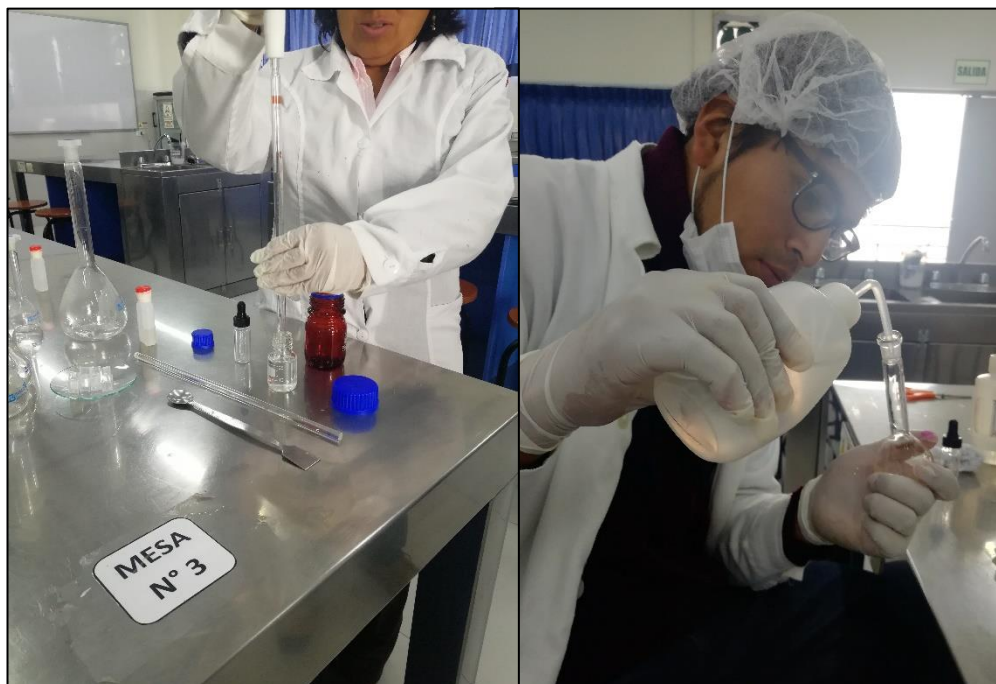


## ANEXO 7: REACTIVOS UTILIZADOS EN EL MÉTODO COLORÍMETRICO





## ANEXO 8: PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO 1:1

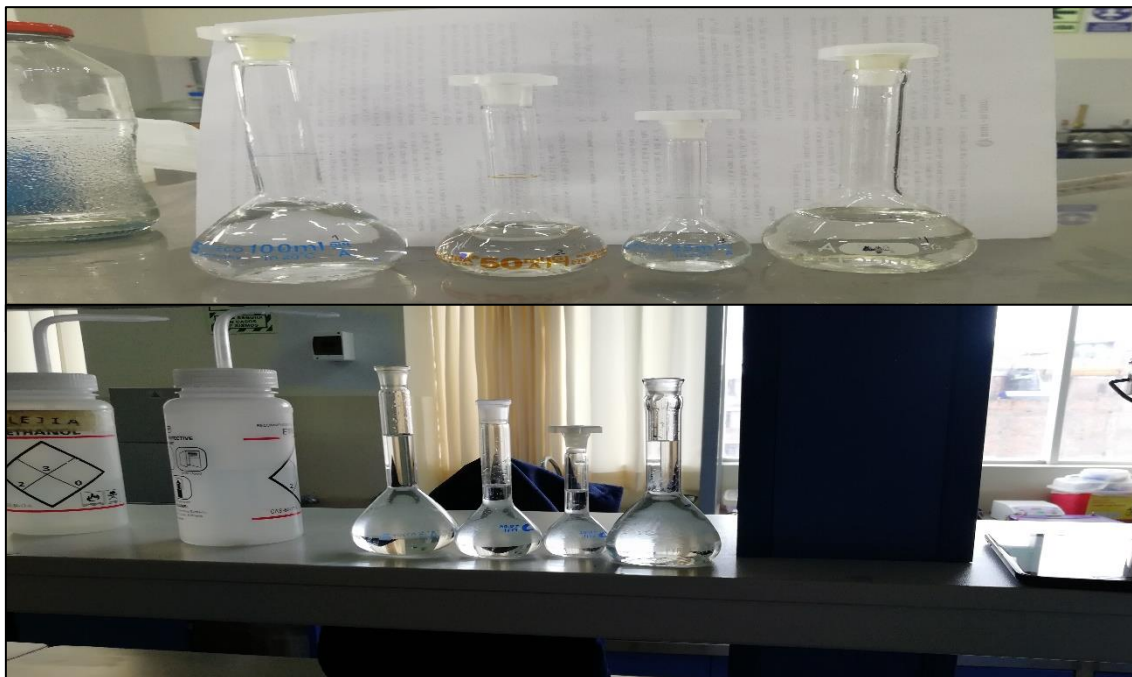




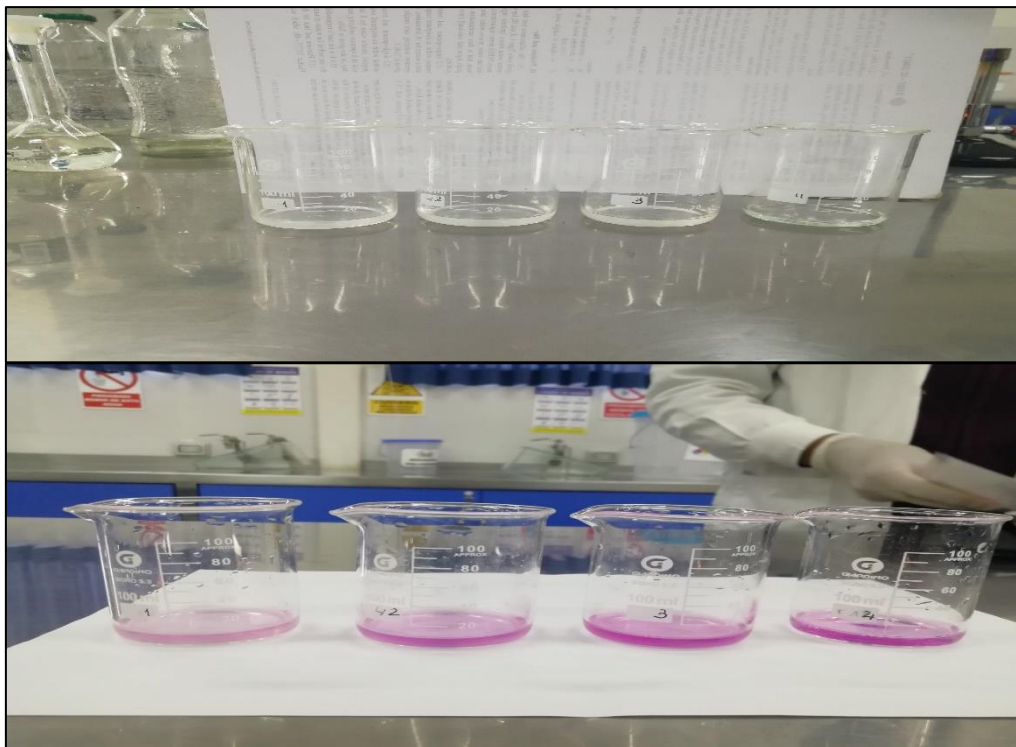
## ANEXO 9: PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE DIFENILCARBAZIDA



## ANEXO 10: PREPARACIÓN DE SOLUCIONES ESTANDAR CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE $\text{Cr}^{+6}$


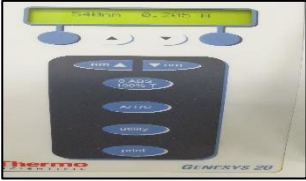

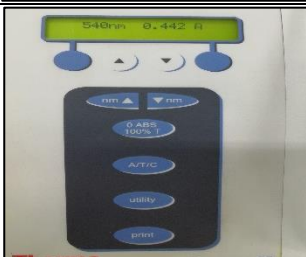


## ANEXO 11: AGREGADO DE DIFENILCARBAZIDA Y ÁCIDO FOSFÓRICO A 5ML DE LAS SOLUCIONES ESTANDAR

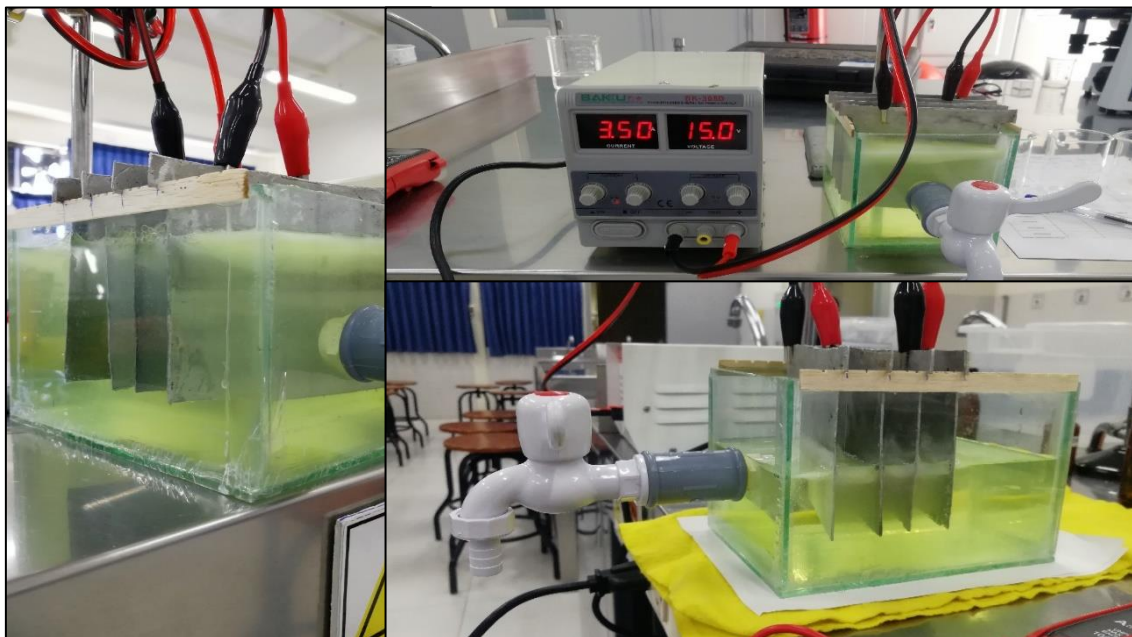


**ANEXO 12: MEDICIÓN DE LAS ABSORBANCIAS DE LAS SOLUCIONES ESTANDAR**



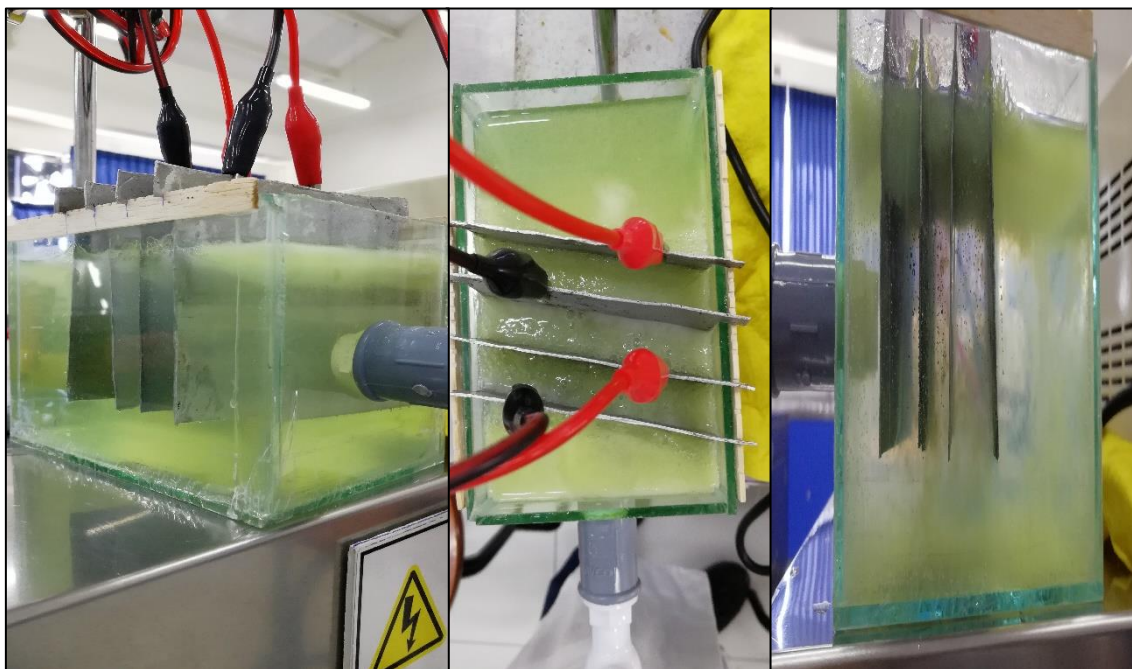
CONCENTRACIÓN DE Cr <sup>+6</sup>	ABSORBANCIAS
0,1 ppm	
0,2ppm	
0,4ppm	
0,5ppm	

### ANEXO 13: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

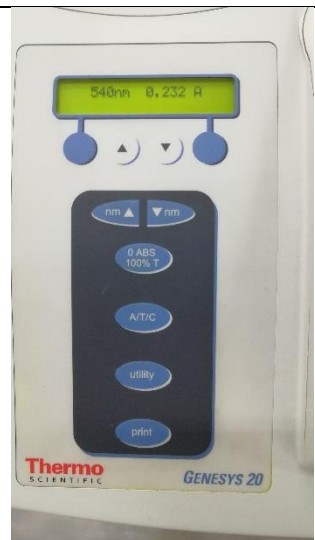











#### ANEXO 14: FORMACIÓN DE COÁGULOS Y FLOCULOS



ANEXO 15: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 1 RÉPLICA I





10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
			

ANEXO 16: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 1 RÉPLICA II


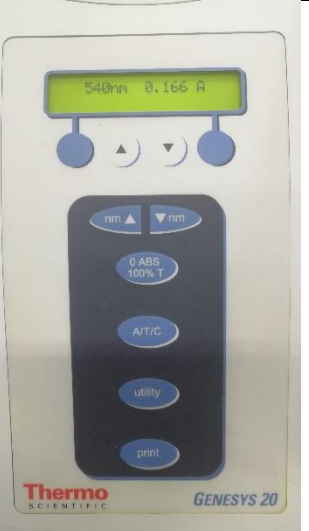
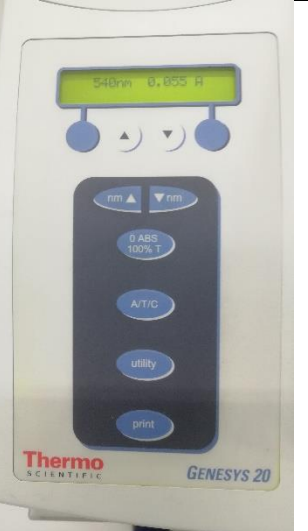

10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
			







ANEXO 17: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 1 RÉPLICA III

10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
			





ANEXO 18: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 2 RÉPLICA I

10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
 <p>The control panel of the Thermo GENESYS 20 device at the 10-minute mark. The LCD screen displays '540nm' and '0.186 A'. The panel includes a numeric keypad, a 'nm' button with up/down arrows, a '0 ABS 100% T' button, an 'A/T/C' button, a 'utility' button, and a 'print' button. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.</p>	 <p>The control panel of the Thermo GENESYS 20 device at the 20-minute mark. The LCD screen displays '540nm' and '0.166 A'. The panel includes a numeric keypad, a 'nm' button with up/down arrows, a '0 ABS 100% T' button, an 'A/T/C' button, a 'utility' button, and a 'print' button. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.</p>	 <p>The control panel of the Thermo GENESYS 20 device at the 30-minute mark. The LCD screen displays '540nm' and '0.055 A'. The panel includes a numeric keypad, a 'nm' button with up/down arrows, a '0 ABS 100% T' button, an 'A/T/C' button, a 'utility' button, and a 'print' button. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.</p>	 <p>The control panel of the Thermo GENESYS 20 device at the 40-minute mark. The LCD screen displays '540nm' and '0.045 A'. The panel includes a numeric keypad, a 'nm' button with up/down arrows, a '0 ABS 100% T' button, an 'A/T/C' button, a 'utility' button, and a 'print' button. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.</p>





**ANEXO 19: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 2 RÉPLICA II**

10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
 The control panel of the Thermo Scientific GENESYS 20 device at the 10-minute mark. The digital display shows '540nm' and '0.199 A'. The panel includes buttons for 'nm' (up/down), '0 ABS 100% T', 'A/T/C', 'utility', and 'print'. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.	 The control panel of the Thermo Scientific GENESYS 20 device at the 20-minute mark. The digital display shows '540nm' and '0.150 A'. The panel includes buttons for 'nm' (up/down), '0 ABS 100% T', 'A/T/C', 'utility', and 'print'. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.	 The control panel of the Thermo Scientific GENESYS 20 device at the 30-minute mark. The digital display shows '540nm' and '0.054 A'. The panel includes buttons for 'nm' (up/down), '0 ABS 100% T', 'A/T/C', 'utility', and 'print'. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.	 The control panel of the Thermo Scientific GENESYS 20 device at the 40-minute mark. The digital display shows '540nm' and '0.046 A'. The panel includes buttons for 'nm' (up/down), '0 ABS 100% T', 'A/T/C', 'utility', and 'print'. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.





ANEXO 20: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 2 RÉPLICA III

10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
			





ANEXO 21: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 3 RÉPLICA I

10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
			




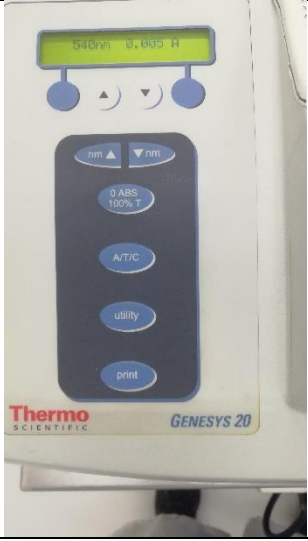
ANEXO 22: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 3 RÉPLICA II

10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
 <p>The control panel of the Thermo GENESYS 20 device at 10 minutes. The digital display shows '540nm' and '0.098 A'. The panel includes buttons for 'nm' (up/down), '0 ABS 100% T', 'A/T/C', 'utility', and 'print'. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.</p>	 <p>The control panel of the Thermo GENESYS 20 device at 20 minutes. The digital display shows '540nm' and '0.063 A'. The panel includes buttons for 'nm' (up/down), '0 ABS 100% T', 'A/T/C', 'utility', and 'print'. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.</p>	 <p>The control panel of the Thermo GENESYS 20 device at 30 minutes. The digital display shows '540nm' and '0.037 A'. The panel includes buttons for 'nm' (up/down), '0 ABS 100% T', 'A/T/C', 'utility', and 'print'. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.</p>	 <p>The control panel of the Thermo GENESYS 20 device at 40 minutes. The digital display shows '540nm' and '0.022 A'. The panel includes buttons for 'nm' (up/down), '0 ABS 100% T', 'A/T/C', 'utility', and 'print'. The Thermo Scientific logo and 'GENESYS 20' model name are visible at the bottom.</p>

ANEXO 23: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 3 RÉPLICA III





10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
			

ANEXO 24: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 4 RÉPLICA I





10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
			



ANEXO 25: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 4 RÉPLICA II

10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
			

ANEXO 26: PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN - TRATAMIENTO 4 RÉPLICA III

10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos
			

## ANEXO 27: HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL ESPECTROFOTÓMETRO GENESYS

20

**Es**

### **Espectroscopia Visible**

#### **GENESYS™ 20 Espectrofotómetro visible**

##### **Un instrumento de bajo costo y fácil uso para aplicaciones educativas y de laboratorio de rutina**

- El sencillo proceso de medición de cuatro pasos es ideal para alumnos y usuarios ocasionales.
- Una variedad de accesorios de soporte de muestra le brindan flexibilidad en el manejo y la aplicación de muestras.
- La pantalla LCD de dos líneas muestra datos e instrucciones sencillas.

Un diseño sencillo y resistente y una construcción duradera hacen al GENESYS 20 ideal para laboratorios educativos, laboratorios de control de calidad, y otras aplicaciones que requieren un instrumento con una huella pequeña y fácil de usar. La pantalla LCD de 20 caracteres y dos líneas indica claramente condiciones de error y brinda instrucciones para la configuración de pruebas y las mediciones. La función automática a cero asegura configuraciones precisas de 0 A y 100 % T. El modo de espera amplía la vida útil de la lámpara y disminuye los costos de operación. El modelo 02650-84 incluye una impresora integrada para la salida de datos.

La flexibilidad de la aplicación está asegurada con la diversidad de soportes de muestras opcionales, entre otros, soportes para tubos de ensayos, viales DQO y celdas para muestras de concentración alta o baja. El software de control de PC VISIONlite® opcional incluye aplicaciones para el escaneo de longitud de onda, análisis fijo de varias longitudes de onda, análisis cuantitativo y cinética.

**Elementos incluidos:** soporte de celda de posición única para cubetas cuadradas de 10 mm y tubos de ensayo de 10 mm de diámetro.



02650-21

**ISO 9001:2008**  
PROVEEDOR CERTIFICADO

Número de catálogo	JZ-02650-21	JZ-02650-84
Tipo/modelo	Longitud de onda de escaneo visible	
Tipo de haz	Haz sencillo	
Ancho de banda	8 nm	
Rango de longitud de onda	325 a 1100 nm	
Exactitud de longitud de onda	±2 nm	
Rangos fotométricos	Transmitancia	0 a 125 % T
	Absorbancia	-0.1 a 2.5 A
	Concentración	0 a 1999 C
Deriva	0.003 A/hora (después del calentamiento)	
Luz parásita	<0.1 % T a 340 y 400 nm	
Lámpara fuente	Lungsteno-halógena	
Vida útil normal de la lámpara	1000 horas	
Pantalla	LCD de 20 caracteres, 2 líneas	
Detector	Un fotodiodo de silicio	
Salida	RS-232 y Centronics	
Dimensiones (An x Al x F)	12" x 7" x 13" (30 x 18 x 33 cm)	
Fuente de poder	Selección automática; 100 a 240 VCA, 50/60 Hz	
Impresora	Ninguna	Integrada
Precio	\$2620.00	\$3100.00

JZ-02652-81 Software VISIONlite 5 para control de la PC y análisis avanzado ..... \$625.00

##### **Soportes de celdas y adaptadores**

Número de catálogo	Descripción	Precio
JZ-02650-84	Soporte de una celda, trayectoria de 1 a 10 mm	\$ 59.50
JZ-02650-95	Soporte de celda de trayectoria larga cilíndrica, 10 a 50 mm	161.00
JZ-02650-97	Soporte de celda de trayectoria larga rectangular, 10 a 50 mm	152.00
JZ-02650-99	Soporte de celda de vial 000	157.00
JZ-02650-96	Soporte de celda de tubo de ensayo de 1", máx. 104 mm de alto	157.00
JZ-02650-98	Soporte de filtro/muestra sólida, máx. 8 mm grosor	250.00